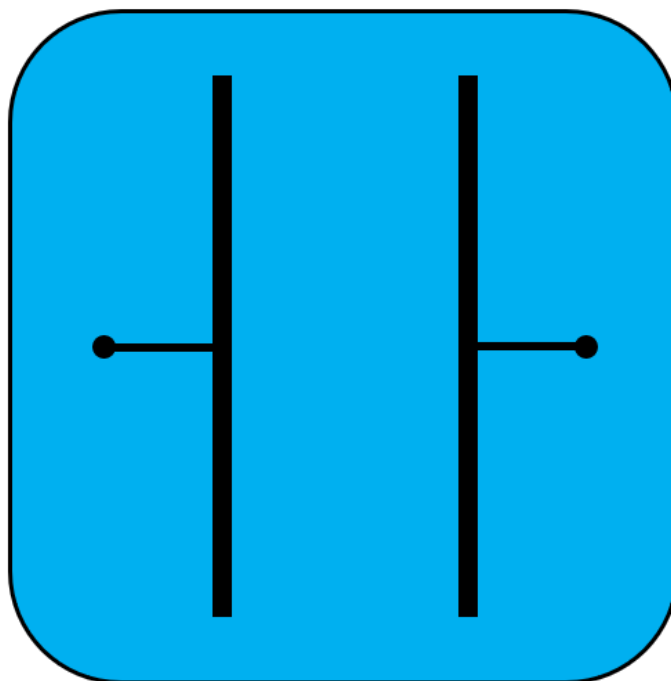


קיבול חשמלי



חוברת תרגילים

פתרונות מלאים

קורס פיזיקה – חשמל

קמפוס IL

הפיקוח על הפיזיקה מציע לכם אוסף תרגילים בנושא קיבול וקבלים המותאמים למיקוד תשפ"ה. תרגילים אלה יופיעו גם בפרק הקיבול והקבלים של קורס ההכנה לבגרות בחשמל ומגנטיות בקמפוס IL. אנו מודים לצוות הפיתוח של קורסי הקמפוס בראשות קובי שורצבורד ואיריס פלד על ההתגייסות המהירה לפיתוח שאלות אלו המיועדות לסייע למורים בהוראה ותרגול פרק הקיבול והקבלים. תודה מיוחדת לקורונה פולינגר על ההירתמות המהירה גם בפרויקט זה.

תוכן עניינים

3.....	קיבול חשמלי, מתח ומטען
9.....	קבל לוחות
20	קבל עם חומר מבודד (חומר דיאלקטרי) בין הלוחות
27	האנרגיה האגורה בקבל טעון
45	שילוב קבלים במעגל זרם (מצב עמיד)
53	חיבור קבלים

קיבול חשמלי, מתח ומטען

תרגיל מספר 1

קבל שקיבולו $C = 5\mu F$ מחובר לסוללה בעלת מתח $V = 9V$.

1. מהו מטען הקבל?

הסבר:

מהגדרת הקיבול של קבל - היחס בין מטען הקבל לבין המתח בין מוליכיו, מקבלים:

$$Q = C \cdot V = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 9 = 45 \cdot 10^{-6} C = 45\mu C$$

2. נניח שהקבל היה מחובר לסוללה בעלת מתח קטן יותר.

קבעו עבור כל אחד מהגדלים הבאים האם הוא היה גדל, היה קטן או היה נותר ללא שינוי:

(1) קיבול הקבל.

(2) מטען הקבל.

הסבר:

(1) הקיבול לא היה משתנה.

הקיבול הינו תכונות של הקבל, ואינו תלוי במתח אליו מחברים את הקבל. מאחר שלא השתנה

כלום בקבל עצמו, הקיבול נותר ללא שינוי.

(2) מטען הקבל היה קטן.

כאשר קיבול הקבל נשאר קבוע, בין המטען הקבל והמתח בין מוליכיו קיים יחס ישר.

מאחר שקיבול הקבל הנתון אינו משתנה, ומאחר שהמתח קטן, מסיקים שגם מטען הקבל קטן.

3. חשבו את מטען הקבל כאשר המתח בין מוליכיו $V = 3V$.

הסבר:

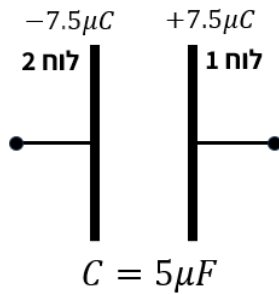
מאחר שקיים יחס ישר בין מטען הקבל למתח בין מוליכיו, אם המתח קטן פי 3, אז גם מטען

הקבל קטן פי 3. לכן:

$$Q = \frac{45\mu C}{3} = 15\mu C$$

דרך נוספת היא חישוב ישיר בעזרת הקשר בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין מוליכיו:

$$Q = C \cdot V = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 3 = 15 \cdot 10^{-6} C = 15\mu C$$



תרגיל מספר 2

נתון קבל לוחות בעל קיבול $C = 5 \mu F$ הטעון כך שעל לוח 1 מטען $7.5 \mu C$ ועל לוח 2 מטען $-7.5 \mu C$.



1. לפניכם טענותיהם של שני תלמידים, עומר ואדם, לאחר שקראו את השאלה.
מי מהתלמידים צודק?
(1) שניהם צודקים.
(2) עומר צודק.
(3) אדם צודק.
(4) אף אחד מהם לא צודק.

הסבר:

הגדרה של המושג "מטען של קבל" – ערכו המוחלט של מטען בכל אחד ממוליכי הקבל.
לכן, לפי הגדרה זו, מטען הקבל הנו: $Q = 7.5 \mu F$ – עומר צודק.

הגדרה נוספת למטען הקבל הנו המטען שעבר בין מוליכיו (במקרה זה לוחותיו) דרך מקור המתח המחובר אליהם בתהליך טעינת הקבל ממצב נטלי. לכן, המטען שחלף מלוח אחד לאחר בטעינת הקבל הוא $7.5 \mu F$ וזהו מטען הקבל.

2. מהו מתח הקבל?

הסבר:

מהגדרת הקיבול של הקבל:

$$C = \frac{Q}{V} \rightarrow V = \frac{Q}{C} = \frac{7.5 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-6}} = 1.5V$$

3. נניח שהקבל היה טעון במטען $Q = 15 \mu C$.

קבעו עבור כל אחד מהגדלים הבאים האם הוא היה גדל, היה קטן או היה נותר ללא שינוי:
(1) קיבול הקבל. (2) מתח הקבל.

הסבר:

(1) הקיבול לא היה משתנה.

הקיבול הינו תכונות של הקבל, ומאחר שלא השתנה כלום בקבל עצמו, הקיבול שלו לא משתנה.

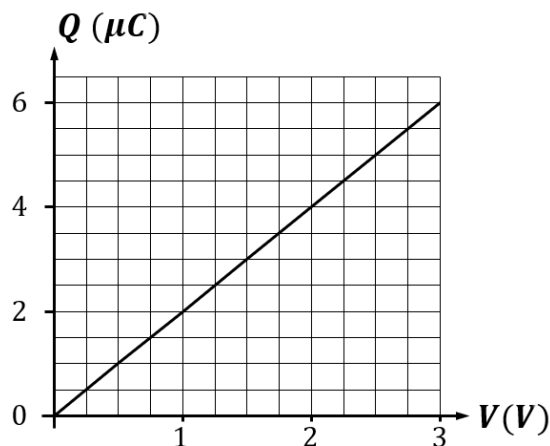
(2) מתח הקבל היה גדל.

כאשר קיבול הקבל קבוע, בין המטען הקבל והמתח בין מוליכיו קיים יחס ישר, על פי הגדרת

הקיבול: $C = \frac{Q}{V}$. מאחר שקיבול הקבל נותר ללא שינוי, ומאחר שמטענו גדל, אז גם מתח הקבל גדל.

תרגיל מספר 3

קבוצה א' של תלמידים ביצעה ניסוי בו הם בדקו את הקשר בין מטען של קבל למתח עליו. הם שינו בכל פעם את מתח הקבל ומדדו את מטענו החשמלי. הגרף הנתון מתאר את תוצאות המדידה של התלמידים.



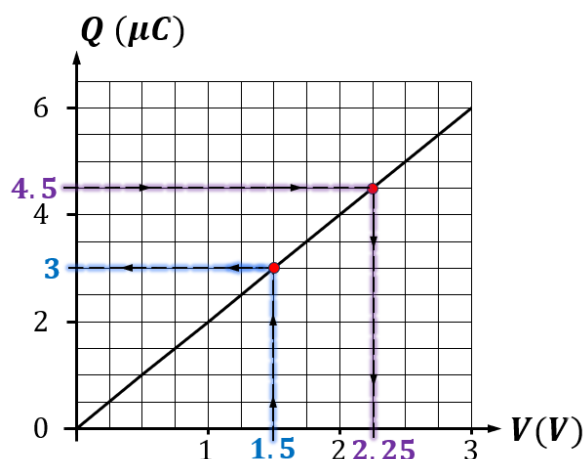
1. בעזרת הגרף הנתון ענו לשאלות (1) ו- (2) הבאות.

(1) מהו מטען הקבל כאשר המתח עליו $1.5V$?

(2) מהו מתח הקבל כאשר מטענו $4.5\mu C$?

הסבר:

את הערכים למטען ולמתח ניתן למצוא בקריאה ישירה מהגרף.



2. חשבו את קיבול הקבל.

הסבר:

נוכל לחשב את קיבול הקבל בעזרת הגדרתו כיחס בין מטען הקבל למתח בין מוליכיו, וניעזר בערכי נקודה על הגרף:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{4.5 \cdot 10^{-6}}{2.25} = 2 \cdot 10^{-6} F = 2\mu F$$

ניתן היה לחשב את קיבול הקבל בעזרת שיפוע הגרף המציין את קיבול הקבל, שהרי המשוואה המתאימה לגרף זה הנה:

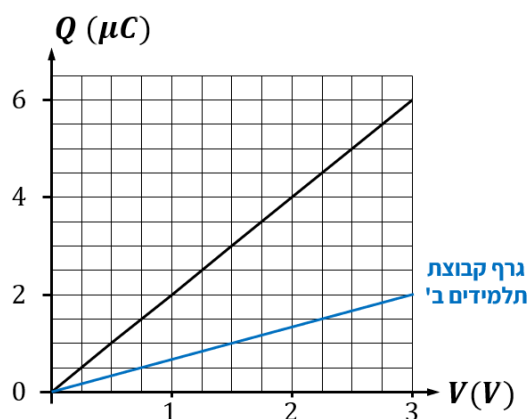
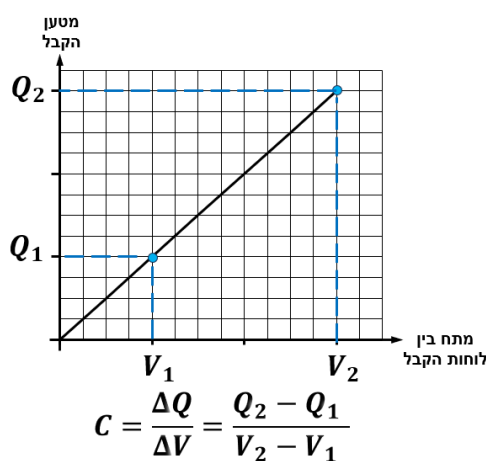
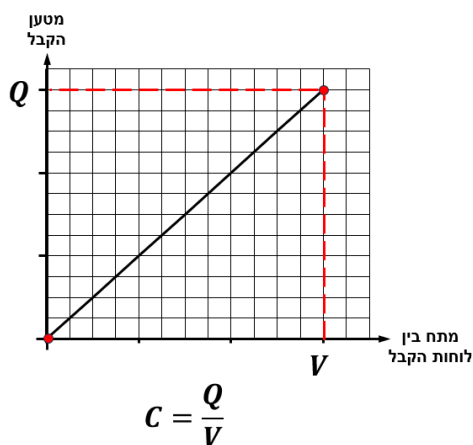
$$Q = C \cdot V$$

נבחר למשל את שתי הנקודות שסומנו בסעיף הקודם ונחשב בעזרתן את שיפוע הגרף:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{4.5 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-6}}{2.25 - 1.5} = 2 \cdot 10^{-6} F = 2\mu F$$

שימו לב:

הגדרת הקיבול כיחס בין מטען הקבל למתח בין מוליכיו מתייחסת למצב ההתחלתי כמצב בו הקבל אינו טעון. הקיבול הנו שיפוע הגרף המתאר את מטען הקבל כתלות במתח בין מוליכיו. מאחר שהגרף עובר בראשית הצירים, שיפוע הגרף הוא גם היחס בין המטען למתח. אבל את השיפוע נוכל לחשב גם בעזרת שתי נקודות על הגרף, ובמקרה זה השיפוע הנו השינוי במטען ביחס לשינוי במתח.



קבוצת תלמידים אחרת, קבוצה ב', ביצעה אותו ניסוי אך עם קבל שונה. הגרף שקבוצה ב' קיבלה משורטט באותה מערכת צירים של גרף קבוצה א'.

4. השלימו את המשפט:

"לפי הגרף, ניתן להבין כי קיבול הקבל בו השתמשה קבוצת תלמידים ב' קטן קיבול הקבל בו השתמשה קבוצת תלמידים א'. כמו כן, לפי הגרף אפשר להסיק כי היחס בין קיבול הקבל שבו השתמשה קבוצת תלמידים א' לבין קיבול הקבל שבו השתמשה קבוצת תלמידים ב' הוא 3".

הסבר:

שיפוע הגרף מייצג את קיבול הקבל. מאחר ששיפוע הגרף שקיבלו התלמידים בקבוצה ב' קטן יותר, מסיקים שהתלמידים בקבוצה ב' השתמשו בקבל בעל קיבול קטן יותר.

מערכי הגרף אפשר לראות כי עבור מתח $3V$ מטען הקבל בו השתמשה קבוצה ב' הוא $2\mu C$, בזמן שמטען בקבל בו השתמשה קבוצה א' היה $6\mu C$. לכן שיפוע הגרף של קבוצה ב' קטן פי 3 משיפוע הגרף של קבוצה א', כלומר קיבול הקבל של קבוצה א' גדול פי 3 מהקיבול של הקבל בו השתמשו תלמידי קבוצה ב'.

תרגיל מספר 4

נתון קבל טעון בעל מתח $V = 3V$.

כאשר מגדילים את המתח לערך $4.5V$ מתברר כי מטענו של הקבל גדל בשיעור $3nC$.

1. מהו קיבול הקבל?

הסבר:

כפי שראינו בתרגיל 3, את הקיבול נוכל לחשב לפי הגדרתו כיחס בין מטען הקבל למתח בין מוליכיו, ונוכל גם לחשבו בעזרת היחס בין השינוי במטען ביחס לשינוי במתח בין מוליכיו. מאחר שאין לנו יודעים את מטענו של הקבל במצב בו המתח בין מוליכיו $3V$, אך אנו יודעים את השינוי במטען בעקבות השינוי במתח, נוכל לחשב את קיבול הקבל בעזרת יחס זה:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{3 \cdot 10^{-9}}{4.5 - 3} = 2 \cdot 10^{-9} F = 2nF$$

2. מהו מטען הקבל כאשר הוא טעון במתח $V = 3V$?

הסבר:

מהגדרת הקיבול של קבל (הקשר בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין מוליכיו):

$$C = \frac{Q}{V} \rightarrow Q = C \cdot V = 2 \cdot 10^{-9} \cdot 3 = 6 \cdot 10^{-9} C = 6nC$$

תרגיל מספר 5

נתונה מערכת המורכבת משני מוליכים.

לאחד מהמוליכים מטען חשמלי $+80nC$ ולמוליך השני מטען חשמלי $-80nC$.

נתון כי הפרש הפוטנציאלים בין המוליכים הנו $20V$.

1. חשבו את הקיבול החשמלי של המערכת.

הסבר:

המערכת הנתונה מהווה למעשה קבל. מהגדרת הקיבול של קבל (הקשר בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין מוליכיו) מקבלים:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{80 \cdot 10^{-9}}{20} = 4 \cdot 10^{-9} F = 4nF$$

נניח שמגדילים את מטען המוליכים כך שעתה מטענם $+200nC$ ו- $-200nC$.

2. קבעו האם בעקבות שינוי המטען החשמלי על כל מוליך קיבול המערכת גדל, קטן או לא משתנה. הסבירו את קביעתכם.

הסבר:

הקיבול הנו תכונות של הקבל, ומאחר שלא השתנה כלום בקבל עצמו, הקיבול לא משתנה.

3. מהו עתה הפרש הפוטנציאלים בין המוליכים?

הסבר:

מהקשר בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין מוליכיו:

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{200 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 10^{-9}} = 50V$$

דרך פתרון נוספת:

כאשר הקיבול קבוע, בין מטען הקבל למתח בין מוליכיו יש יחס ישר.

לכן, כאשר המטען גדל פי $2.5 = \frac{200}{80}$, גם המתח יגדל פי 2.5 :

$$V = 20 \cdot 2.5 = 50V$$

קבל לוחות

תרגיל מספר 6

נתון קבל לוחות שאינו טעון, ששטח לוחותיו $A = 20\text{cm}^2$ והמרחק ביניהם הוא $d = 5\text{mm}$.
התווך בין הלוחות הינו ריק.

1. חשבו את קיבול הקבל.
הסבר:

נציב את הערכים המספריים בנוסחה לחישוב קיבול קבל לוחות:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} = 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{20 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-3}} = 3.54 \cdot 10^{-12} F$$

מחברים את הקבל למקור מתח אידיאלי $V = 5V$ וממתינים עד גמר הטעינה.
2. חשבו את מטען הקבל.
הסבר:

מהקשר בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין לוחותיו:

$$Q = C \cdot V = 3.54 \cdot 10^{-12} \cdot 5 = 1.77 \cdot 10^{-11} = 17.7 \cdot 10^{-12} C$$

עתה מנתקים את הקבל ממקור המתח ומרחיקים את הלוחות הקבל.
3. (1) קבעו האם קיבול הקבל גדל, קטן או נותר ללא שינוי.
(2) קבעו האם מטען הקבל גדל, קטן או נותר ללא שינוי.
(3) קבעו האם מתח הקבל גדל, קטן או נותר ללא שינוי.
הסבירו את קביעתכם.
הסבר:

(1) קיבול קבל לוחות נמצא ביחס הפוך למרחק בין הלוחות, שהרי:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

לכן, אם המרחק בין הלוחות גדל, קיבול הקבל קטן.

(2) מאחר שמקור המתח מנותק, מטען הקבל לא משתנה. הדבר נובע מכך שמטען כל אחד מהלוחות אינו יכול להשתנות, שהרי אין כעת למטענים אפשרות מעבר מלוח אחד ללוח שני.

(3) מהגדרת קיבול הקבל:

$$C = \frac{Q}{V}$$

מבינים שכאשר ומטען הקבל לא משתנה, יש יחס הפוך בין הקיבול והמתח. מכאן שאם הקיבול קטן, מסיקים שמתח הקבל גדל.

תרגיל מספר 7

נתונים שלושה קבלי לוחות שבתחום בין הלוחות - ריק.

קבל 1 – שטח לוחותיו 40cm^2 והמרחק בין לוחותיו $d_1 = d$.

קבל 2 – שטח לוחותיו 80cm^2 והמרחק בין לוחותיו $d_2 = d$.

קבל 3 – שטח לוחותיו 80cm^2 והמרחק בין לוחותיו $d_3 = d$.

מחברים את שלושת הקבלים, זה אחר זה, לאותו מקור מתח אידיאלי $V = 900\text{V}$ ומנתקים את הקבל מהמקור לאחר גמר הטעינה.

נתון כי קבל 1 נטען במטען $Q_1 = 3.6\text{nC}$.

1. חשבו את קיבול קבל 1.

הסבר:

מהגדרת הקיבול של קבל:

$$C_1 = \frac{Q_1}{V} = \frac{3.6 \cdot 10^{-9}}{900} = 4 \cdot 10^{-12}\text{F}$$

2. חשבו את המרחק d_1 - המרחק בין הלוחות של קבל 1.

הסבר:

מנוסחה לחישוב קיבול קבל לוחות:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \rightarrow d = \frac{\epsilon_0 A}{C}$$

נציב את הערכים המספריים:

$$d_1 = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 40 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-12}} = 8.85 \cdot 10^{-3}\text{m} = 8.85\text{mm}$$

3. מהו קיבול קבל 2?

הסבר:

קיבול קבל לוחות נמצא ביחס ישר לשטח לוחותיו, שהרי:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

מאחר ששטח הלוחות של קבל 2 גדול פי 2 משטח לוחות קבל 1, ומאחר והמרחק בין הלוחות של קבל 2 שווה למרחק בין הלוחות של קבל 1, קיבולו של קבל 2 גדול פי 2 מזה של קבל 1:

$$C_2 = 2C_1 = 2 \cdot 4 \cdot 10^{-12} = 8 \cdot 10^{-12}\text{F}$$

דרך פתרון נוספת – חישוב ישיר, לפי הנוסחה לחישוב קיבול קבל לוחות:

$$C_2 = \epsilon_0 \frac{A_2}{d_2} = 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{80 \cdot 10^{-4}}{8.85 \cdot 10^{-3}} = 8 \cdot 10^{-12} F$$

4. מה מטענו של קבל 2?

הסבר:

כאשר המתח קבוע קיים יחס ישר בין מטען הקבל לקיבולו. לכן נקבל כי אם הקיבול של קבל 2 גדול פי 2 מזה של קבל 1 והמתח שלהם שווה, אז מסיקים שגם המטען של קבל 2 גדול פי 2 מזה של קבל 1:

$$Q_2 = 2Q_1 = 2 \cdot 3.6 \cdot 10^{-9} = 7.2 \cdot 10^{-9} C = 7.2 nC$$

דרך נוספת – חישוב בעזרת הקשר בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין מוליכיו:

$$Q_2 = C_2 \cdot V = 8 \cdot 10^{-12} \cdot 900 = 7.2 \cdot 10^{-9} C = 7.2 nC$$

5. נתון כי מטענו של קבל 3 שווה למטענו של קבל 1. מהו המרחק d_3 - המרחק בין לוחות קבל 3?

הסבר:

נחשב תחילה את קיבול קבל 3:

$$C_3 = \frac{Q_3}{V_3} = \frac{3.6 \cdot 10^{-9}}{900} = 4 \cdot 10^{-12} F$$

מנוסחה לחישוב קיבול קבל לוחות:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \rightarrow d = \frac{\epsilon_0 A}{C}$$

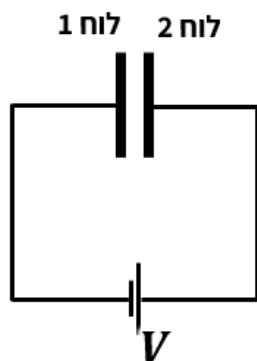
נציב את הערכים המספריים:

$$d_3 = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 80 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-12}} = 17.7 \cdot 10^{-3} m = 17.7 mm$$

דרך פתרון נוספת:

מאחר שהמתח בין לוחות קבל 3 ומטענו זהים לאלה של קבל 1, מסיקים שקיבולו של קבל 3 שווה לקיבולו של קבל 1. אבל, אם הקיבולים שווים ושטח הלוחות של קבל 3 גדול פי 2 מזה של קבל 1, מבינים שהמרחק בין הלוחות של קבל 3 גדול פי 2 מזה של קבל 1.

תרגיל מספר 8



נתון קבל לוחות שהמרחק בין לוחותיו $d = 4mm$ ובין הלוחות ריק.
מחברים את הקבל למקור מתח אידיאלי $V = 1kV$ והוא נטען במטען $Q = 5nC$. בתרשים מתואר הקבל ומקור המתח.

1. מהו קיבול הקבל?

הסבר:

מהקשר בין מטען הקבל, קיבול והמתח בין מוליכיו:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{5 \cdot 10^{-9}}{1000} = 5 \cdot 10^{-12} F$$

2. מהו השטח של כל אחד מהלוחות?

הסבר:

מנוסחה לחישוב קיבול קבל לוחות:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \rightarrow A = \frac{C \cdot d}{\epsilon_0}$$

נציב את הערכים המספריים:

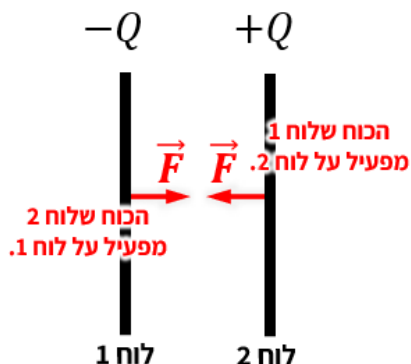
$$A = \frac{5 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{8.85 \cdot 10^{-12}} = 2.26 \cdot 10^{-3} m^2 = 22.6 cm^2$$

3. מהו מטענו של לוח 1?

הסבר:

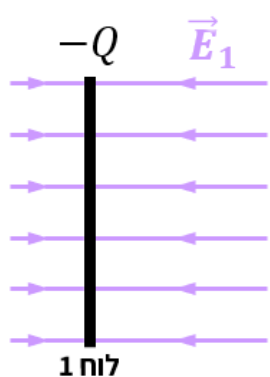
מקור המתח מחובר לקבל כך שההדק השלילי מחובר ללוח 1 וההדק החיובי ללוח 2, לכן בטעינת הקבל מטען חשמלי עבור מלוח 1, דרך מקור המתח, ללוח 2. אם כך, לוח 1 טוען במטען שלילי והוא $Q_1 = -5nC$ ולוח 2 במטען חיובי והוא $Q_2 = +5nC$.

4. חשבו את גודל הכוח ההדדי שהלוחות מפעילים זה על זה. הניחו כי הלוחות נחשבים לגדולים מאוד ביחס למרחק בניהם, וכי השדה שכל לוח יוצר הוא שדה אחיד.



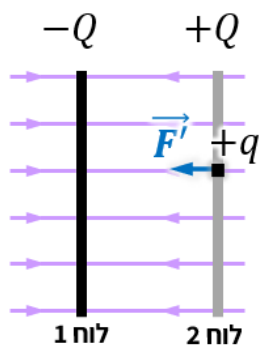
הסבר:

לפי חוק שלישי של ניוטון, הכוחות מפעילים זה על זה כוחות השווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם, ולכן לחישוב גודל הכוח נחשב את הכוח שלוח 1 מפעיל על לוח 2.



מאחר ואנו מניחים שהשדה של כל לוח הוא שדה אחיד והלוח נחשב לאינסופי, השדה שלוח 1 יוצר במקום בו לוח 2 הוא שדה המכוון אופקית ימינה (לוח 1 טעון במטען שלילי) וגודלו:

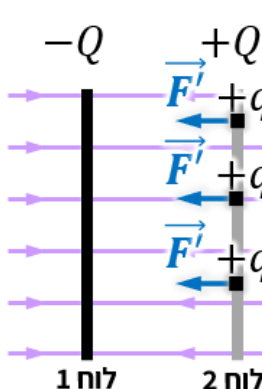
$$E_1 = \frac{Q}{2A\epsilon_0}$$



כל יחידת מטען של לוח 2 נמצא באותו שדה של לוח אחד, לכן גודל הכוח שהשדה $\vec{E}_1$ מפעיל על יחידת מטען קטנה q של לוח 2 הוא:

$$F' = qE_1 = q \cdot \frac{Q}{2A\epsilon_0}$$

לוח 2 נמצא בשדה של לוח 1, $\vec{E}_1$, המפעיל כוח, $\vec{F}'$, על יחידת מטען של לוח 2.



מאחר ועל כל יחידות המטען לאורך לוח 2 הכוח החשמלי מהשדה $\vec{E}_1$ שווה (הן בגודלו והן בכיוונו), הכוח הכולל שהשדה מפעיל על כל מטעני לוח 2 הנו:

$$F = Q \cdot \frac{Q}{2A\epsilon_0} = \frac{Q^2}{2A\epsilon_0}$$

נציב את הערכים המספריים:

$$F = \frac{Q^2}{2A\epsilon_0} = \frac{(5 \cdot 10^{-9})^2}{2 \cdot 2.26 \cdot 10^{-3} \cdot 8.85 \cdot 10^{-12}} \approx 6.25 \cdot 10^{-4} \text{ N}$$

כאשר הקבל נשאר מחובר למקור המתח, מקרבים את הלוחות זה לזה.

5. קבעו עבור כל אחד מהגדלים הבאים האם הוא גדל, קטן או לא משתנה:

(1) קיבול הקבל.

(2) מתח הקבל.

(3) מטען הקבל.

(4) גודל הכוח ההדדי שהלוחות מפעילים זה על זה.

הסבירו את קביעתכם.

הסבר:

(1) קיבול הקבל גדל.

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

מהנוסחה לחישוב קיבול של קבל לוחות: $C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$ מוכן כי קיבול הקבל גדל.

(2) מתח הקבל לא משתנה.

מאחר שהקבל נשאר מחובר למקור המתח, מתח הקבל נשאר כפי שהיה.

(3) מטען הקבל גדל.

$$Q = C \cdot V$$

מטען הקבל שווה למכפלה של קיבול הקבל במתח בין לוחותיו: $Q = C \cdot V$. מכאן שגם מטען הקבל גדל.

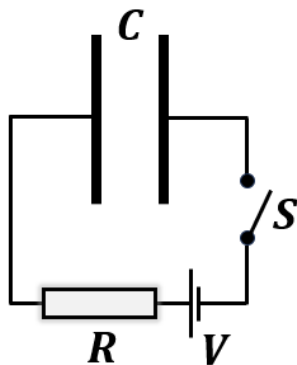
(4) גודל הכוח ההדדי שהלוחות מפעילים זה על זה גדל.

בסעיף 3 פיתחנו את הביטוי לגודל הכוח ההדדי שהלוחות מפעילים זה על זה:

$$F = \frac{Q^2}{2A\epsilon_0}$$

נבחין כי שטח הלוחות נותר ללא שינוי, אך המטען החשמלי של הקבל גדל. לכן גם גודל הכוח ההדדי שהלוחות מפעילים זה על זה גדל.

תרגיל מספר 9



נתון מעגל חשמלי הכולל קבל לוחות שאינו טעון, בעל קיבול $C = 5\mu F$, מקור מתח אידיאלי $V = 12V$, נגד שהתנגדותו $R = 10\Omega$, ומתג S . סוגרים את המתג וממתינים עד גמר טעינת הקבל.

1. מהו מתח הקבל בגמר טעינתו?

הסבר:

לאחר גמר טעינת הקבל אין זרם במעגל ולכן המתח בין קצות הנגד אפס. אם כך, המתח בין לוחות הקבל שווה למתח של מקור המתח $V = 12V$.

2. חשבו את מטען הקבל בגמר הטעינה.

הסבר:

מהקשר בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין מוליכיו:

$$Q = C \cdot V = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 12 = 60 \cdot 10^{-6} C = 60\mu C$$

במקרה אחר משתמשים בנגד אחר, שהתנגדותו החשמלית גדולה יותר. סוגרים את המתג וממתינים עד גמר טעינת הקבל.

3. השלימו את המשפט:

"בעקבות הגדלת ההתנגדות, לאחר גמר הטעינה מטען הקבל אינו משתנה ביחס למטען הקבל טרם שינוי ההתנגדות, ומתח הקבל שווה ל- מתח מקור המתח. הגדלת ההתנגדות מאריכה את זמן טעינת הקבל".

הסבר:

מאחר שאחרי סיום הטעינה לא זורם זרם במעגל, המתח בין קצות הנגד אפס, כך שהמתח בין לוחות הקבל שווה למתח מקור המתח. לכן המתח והמטען של הקבל לא משתנים. התנגדות הנגד משפיעה אך ורק על זמן תהליך הטעינה. מאחר שההתנגדות גדולה יותר, הטעינה תימשך זמן ארוך יותר.

תרגיל מספר 10

לקבל לוחות קיבול $C = 2\mu F$ והמרחק בין לוחותיו $d = 1mm$.

טוענים את הקבל בעזרת מקור מתח אידיאלי ולאחר גמר הטעינה מנתקים את המקור.

עוצמת (גודל) השדה החשמלי בתחום בין שני הלוחות היא $E = 2 \cdot 10^4 N/C$.

1. חשבו את מתח הקבל.

הסבר:

גודל (עוצמת) השדה החשמלי בין לוחות הקבל הינו:

$$E = \frac{V}{d} \rightarrow V = E \cdot d$$

נציב את הערכים המספריים:

$$V = E \cdot d = 2 \cdot 10^4 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 20V$$

2. חשבו את מטען הקבל.

הסבר:

מהגדרת הקיבול של קבל, המקשרת בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין מוליכיו מקבלים:

$$Q = C \cdot V = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 20 = 40 \cdot 10^{-6} C = 40\mu C$$

עתה מכפילים את המרחק בין לוחות הקבל שנותק ממקור המתח.

3. מהי עוצמת השדה החשמלי בתחום בין לוחות הקבל?

הסבר:

השדה בין לוחות הקבל הינו:

$$E = \frac{Q}{A\epsilon_0}$$

מאחר ושטח הלוחות לא השתנה, ומאחר והמקור מנותק, אז מטען הקבל לא משתנה, עוצמת השדה החשמלי בין הלוחות אינה משתנה.

במקרה אחר, לאחר גמר טעינת הקבל, משאירים אותו מחובר למקור המתח ומכפילים את המרחק בין הלוחות.

4. מהי במקרה זה עוצמת השדה החשמלי בתחום בין לוחות הקבל?

הסבר:

בשונה מהמקרה המתואר בסעיף 3, הפעם מקור המתח מחובר ולכן המתח בין לוחות הקבל נשאר קבוע.

גודל (עוצמת) השדה החשמלי בין לוחות הקבל הינו:

$$E = \frac{V}{d}$$

אם המתח נותר ללא שינוי אך המרחק גדל פי 2, השדה קטן פי 2.

$$E = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 10^4 = 1 \cdot 10^4 \text{ N/C}$$

דרך פתרון נוספת:

מנוסחת הקיבול של קבל לוחות:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

הכפלת המרחק בין הלוחות גורמת להקטנת הקיבול פי 2.

הקשר בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין לוחותיו:

$$Q = C \cdot V$$

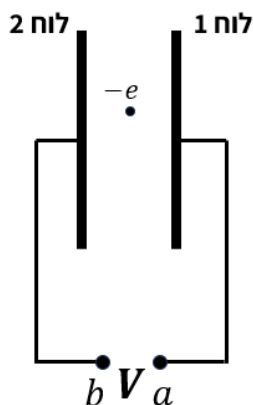
המתח נשאר קבוע, הקיבול קטן פי 2, לכן מטען הקבל קטן פי 2.

עוצמת השדה בין לוחות קבל הנה:

$$E = \frac{Q}{A\epsilon_0}$$

שטח הלוחות לא השתנה, ומטען הקבל קטן פי 2. המסקנה היא שעוצמת השדה החשמלי בין הלוחות קטנה פי 2 ולכן:

$$E = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 10^4 = 1 \cdot 10^4 \text{ N/C}$$



תרגיל מספר 11

קבל לוחות שקיבולו $C = 2\mu F$ מחובר למקור מתח אידיאלי $V = 12V$.

במקרה א', בין הלוחות משחררים ממנוחה אלקטרון והוא מואץ ימינה לעבר לוח 1.

מערכת הקבל, מקור המתח והאלקטרון מתוארים בתרשים.

הזניחו את כוח הכובד הפועל על האלקטרון.

1. לאיזו נקודה, a או b , פוטנציאל חשמלי גדול יותר?

הסבר:

נתון כי האלקטרון מואץ לעבר לוח 1, לכן הכוח החשמלי עליו מכוון אופקית ימינה.

לפי הקשר בין הכוח החשמלי על חלקיק טעון לבין השדה החשמלי, $\vec{F} = q\vec{E}$, היות והאלקטרון בעל מטען חשמלי שלילי, הכוח החשמלי עליו מנוגד לשדה החשמלי בין הלוחות. לכן מבינים שהשדה החשמלי מכוון אופקית שמאלה – לעבר לוח 2.

השדה חשמלי מכוון תמיד לעבר הפוטנציאל הנמוך, לכן ללוח 2 הפוטנציאל הנמוך וללוח 1 הפוטנציאל הגבוה.

הלוח שהפוטנציאל שלו גבוה יותר מחובר להדק החיובי של מקור המתח, לכן מסיקים שלנקודה a פוטנציאל חשמלי גדול יותר.

2. חשבו את מטען לוח 2.

הסבר:

מהקשר בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין לוחותיו:

$$Q = C \cdot V = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 12 = 24 \cdot 10^{-6} C = 24\mu C$$

מפני שלוח 2 מחובר להדק השלילי של מקור המתח, הפוטנציאל שלו נמוך יותר ומטענו שלילי

$$Q_2 = -24\mu C, \quad Q_1 = +24\mu C \text{ (מטענו של לוח 1 חיובי)}$$

במקרה ב', בעוד מקור המתח מחובר, מקרבים את הלוחות.

משחררים גם הפעם בין הלוחות אלקטרון ממנוחה.

3. קבעו האם גודל תאוצת האלקטרון במקרה ב' גדולה, קטנה או שווה לגודל תאוצת האלקטרון במקרה א'. הסבירו את קביעתכם.

הסבר:

מקור המתח מחובר ולכן המתח בין הלוחות נותר ללא שינוי.

$$E = \frac{V}{d} \text{ (עוצמת השדה החשמלי בין לוחות הקבל הינו)}$$

מאחר והמתח נותר ללא שינוי, אך המרחק בין הלוחות קטן, עוצמת השדה החשמלי קטנה.

לכן גודל הכוח החשמלי על האלקטרון קטן, ועל פי חוק שני של ניוטון תאוצת האלקטרון תהיה קטנה יותר.

תרגיל מספר 12

נתון קבל לוחות לא טעון בעל שטל לוחות A והמרחק בניהם d . מחברים את הקבל למקור מתח אידיאלי V .

1. בטאו, באמצעות ϵ_0, A, d, V (כולם או חלקם), את מטען הקבל. הסבר:

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

מהגדרת קיבול הקבל, המקשרת בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין לוחותיו מקבלים:

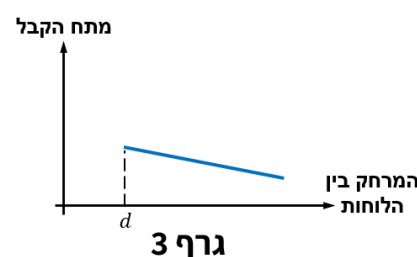
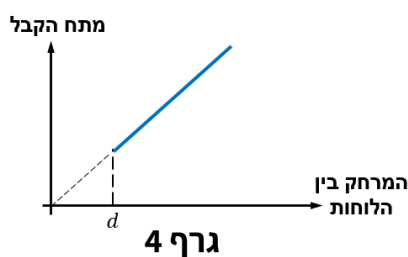
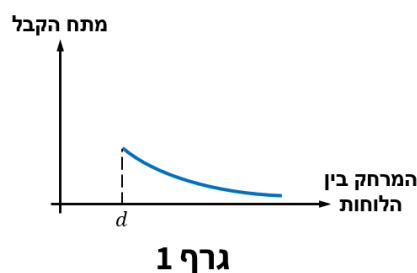
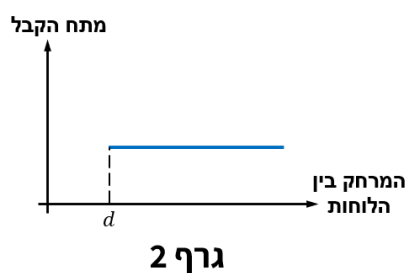
$$Q = C \cdot V = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \cdot V$$

2. בטאו, באמצעות ϵ_0, A, d, V (כולם או חלקם), את עוצמת השדה החשמלי בתחום בין שני הלוחות. הסבר:

$$E = \frac{V}{d}$$

עתה מנתקים את הקבל ממקור המתח ולאחר מכן מגדילים בהדרגה את המרחק בין לוחות הקבל.

3. בחרו, מבין הגרפים (1) – (4), את הגרף המתאר נכון את מתח הקבל ביחס למרחק בין הלוחות. הסבירו את בחירתכם.



הסבר:

בסעיף 1 קיבלנו את הביטוי למטען הקבל וממנו נבודד את המתח בין לוחות הקבל:

$$Q = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \cdot V \rightarrow V = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot A} \cdot d$$

מאחר שמקור המתח מנותק, מטען הקבל נשאר קבוע בזמן שינוי המרחק בין הלוחות. לכן המתח בין לוחות הקבל נמצא ביחס ישר למרחק בין הלוחות – ככל שהמרחק גדל, המתח גדל באותו יחס.

לכן הגרף המתאים הוא גרף 4.

קבל עם חומר מבודד (חומר דיאלקטרי) בין הלוחות

תרגיל מספר 13

נתון קבל לוחות לא טעון שקיבולו $C_0 = 2\mu F$ ובין לוחותיו ריק.

מכניסים לתחום בין הלוחות חומר מבודד בעל מקדם דיאלקטרי יחסי $\epsilon_r = 3$ הממלא את כל הנפח שבין הלוחות ולאחר מכן מחברים את הקבל למקור מתח אידיאלי $V = 9V$ וממתינים עד לגמר הטעינה.

1. מהו קיבול הקבל לאחר הכנסת החומר המבודד?
הסבר:

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

נוסחת הקיבול של קבל לוחות כאשר בין הלוחות ריק:

וכאשר בין לוחות הקבל חומר מבודד, קיבולו: $C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$
רואים שהכנסת חומר מבודד בין לוחות הקבל גורם להכפלת הקיבול בקבוע הדיאלקטרי היחסי, ϵ_r , של אותו חומר מבודד:

$$C = \epsilon_r C_0 = 3 \cdot 2\mu F = 6\mu F$$

2. מהו מטען הקבל לאחר גמר טעינתו?
הסבר:

מהקשר בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין מוליכיו:

$$Q = C \cdot V = 6 \cdot 10^{-6} \cdot 9 = 54 \cdot 10^{-6} C = 54\mu C$$

אחרי סיום הטעינה, מנתקים את הקבל ממקור המתח ומוציאים את החומר המבודד מבין הלוחות.

3. מהו מטען הקבל לאחר הוצאת החומר המבודד?
הסבר:

מאחר שהקבל כבר לא מחובר למקור המתח, מטענו לא יכול להשתנות, כך שלאחר הוצאת החומר המבודד המטען נשאר כפי שהיה.

4. מהו מתח הקבל לאחר הוצאת החומר המבודד?
הסבר:

לאחר הוצאת החומר המבודד קיבול הקבל חוזר לערך הנתון בתיאור התרגיל והוא $C_0 = 2\mu F$. מנוסחת ההגדרה של הקיבול, המקשרת בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין מוליכיו:

$$C = \frac{Q}{V} \rightarrow V = \frac{Q}{C} = \frac{54 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-6}} = 27V$$

5. בעקבות הוצאת החומר המבודד, איזה מהמשפטים הבאים הוא הנכון?

- (1) עוצמת השדה החשמלי בתחום בין הלוחות גדלה.
- (2) עוצמת השדה החשמלי בתחום בין הלוחות לא משתנה.
- (3) עוצמת השדה החשמלי בתחום בין הלוחות קטנה.
- (4) אי אפשר לדעת מה קורה לעוצמת השדה החשמלי בין הלוחות.

הסבירו את בחירתכם.

הסבר:

בעקבות הוצאת החומר המבודד, המתח בין לוחות הקבל גדל.

גודל (עוצמת) השדה החשמלי בין לוחות הקבל הינו:

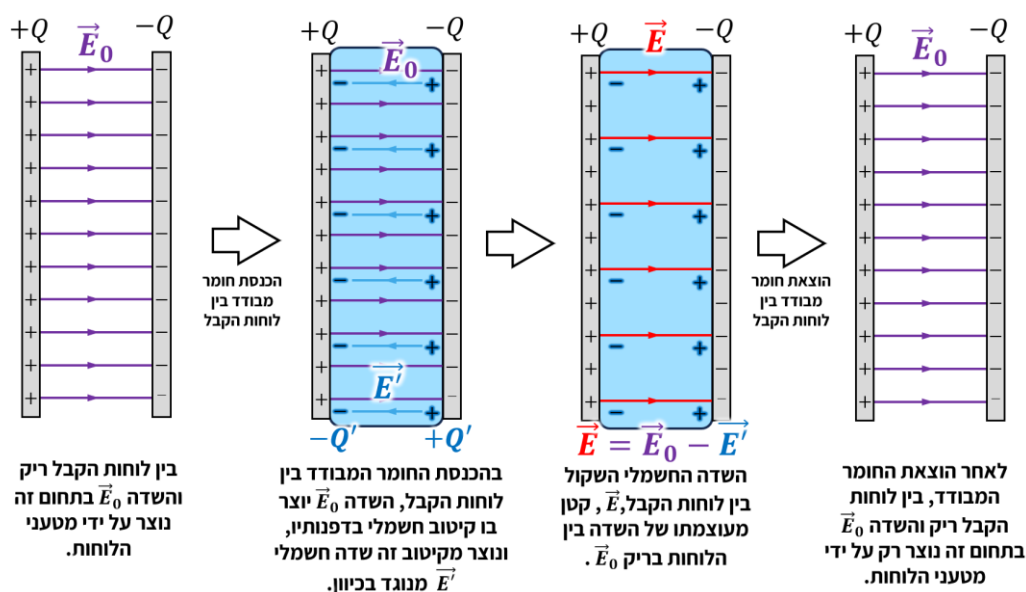
$$E = \frac{V}{d}$$

מאחר שהמתח גדל והמרחק בין הלוחות לא משתנה, מסיקים כי עוצמת השדה החשמלי גדלה.

דרך פתרון נוספת – הסבר פיזיקלי מילולי:

השדה החשמלי בין לוחות הקבל כאשר יש ביניהם חומר מבודד הוא קטן מזה שאין חומר מבודד אלא יש ריק. הסיבה היא שהשדה החשמלי הנוצר בין הלוחות על ידי מטעני הלוחות גורם לקיטוב חשמלי בתוך החומר המבודד; עקב הקיטוב, נוצר בחומר המבודד שדה חשמלי (הנקרא גם "שדה חשמלי מושרה"), המנוגד בכיוונו לשדה החשמלי של מטעני הלוחות. כלומר עתה יש בין לוחות הקבל שדה חשמלי שקול, שהוא קטן מהשדה שמטעני הלוחות לבדם יוצרים.

בהוצאת החומר המבודד לא קיים יותר השדה השני, שנוצר עקב הקיטוב בחומר המבודד, ולכן השדה בין הלוחות גדל.



תרגיל מספר 14

נתון קבל לוחות שקיבולו $C = 0.177 \text{ nF}$, שבין לוחותיו חומר מבודד עם קבוע דיאלקטרי יחסי ϵ_r , הממלא את כל הנפח שבין הלוחות.

שטח לוחות הקבל $A = 100 \text{ cm}^2$ והמרחק בין הלוחות $d = 1 \text{ mm}$.
מחברים את הקבל למקור מתח אידיאלי $V = 12 \text{ V}$ וממתינים לגמר טעינת הקבל.
1. חשבו את הקבוע הדיאלקטרי היחסי של החומר המבודד, ϵ_r .

הסבר:

מנוסחת קיבול של קבל לוחות:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \rightarrow \epsilon_r = \frac{Cd}{\epsilon_0 A}$$

נציב את הערכים המספריים:

$$\epsilon_r = \frac{0.177 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 100 \cdot 10^{-4}} = 2$$

2. מהו מטען הקבל לאחר גמר טעינתו?

הסבר:

מהגדרת הקיבול של קבל כיחס בין מטענו למתח בין לוחותיו מקבלים:

$$Q = C \cdot V = 0.177 \cdot 10^{-9} \cdot 12 = 2.124 \cdot 10^{-9} \text{ C} = 2.124 \text{ nC}$$

בעוד הקבל מחובר למקור המתח, מוציאים את החומר המבודד מבין הלוחות.
3. מהו מתח הקבל לאחר הוצאת החומר המבודד?

הסבר:

היות והקבל נשאר מחובר למקור המתח, המתח בין לוחות הקבל נשאר כפי שהיה.

4. מהו קיבול הקבל?

הסבר:

מהנוסחה של קיבול קבל לוחות, הקיבול נמצא ביחס ישר לקבוע הדיאלקטרי היחסי, ϵ_r .

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

אחרי הוצאת החומר המבודד, בין לוחות הקבל יהיה ריק, כך שהקיבול יהיה: $C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d}$.
כפי שניתן לראות, הוצאת החומר המבודד מקטינה את הקיבול פי ϵ_r . לכן:

$$C_0 = \frac{C}{\epsilon_r} = \frac{0.177 \cdot 10^{-9}}{2} = 88.5 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

5. בעקבות הוצאת החומר המבודד, קבעו האם מטען הקבל גדל, קטן או אינו משתנה.
הסבירו את קביעתכם.

הסבר:

מהגדרת הקיבול של קבל מקבלים: $Q = C \cdot V$.

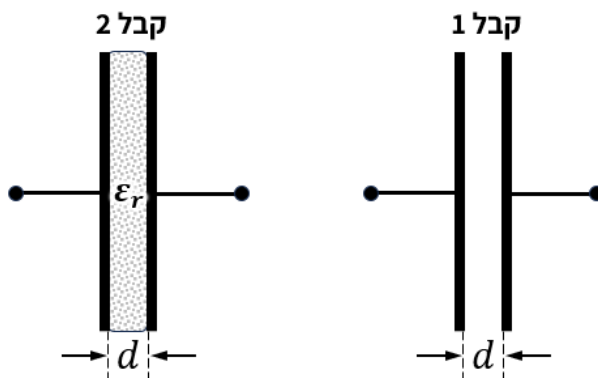
הוכחנו שקיבול הקבל קטן, בזמן שהמתח בין לוחותיו לא משתנה. מכאן שמטען הקבל קטן.

תרגיל מספר 15

נתונים שני קבלי לוחות זהים בשטח הלוחות ובמרחק ביניהם, d .

וקיבולו של קבל 1 הוא C_0 ובין לוחותיו ריק.

בין לוחותיו של קבל 2 פיסת זכוכית הממלאת את כל הנפח בין הלוחות, וקבוע דיאלקטרי שלה $\epsilon_r = 5$.



מחברים את הקבלים לשני מקורות מתח זהים ולאחר גמר הטעינה מנתקים אותם ממקורות המתח.

1. בטאו, באמצעות C_0 , את קיבול קבל 2.

הסבר:

מנוסחת קיבול של קבל לוחות, קיבולו של קבל 2:

$$C_2 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} = 5 \cdot \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

מאחר ובין לוחות קבל 1 ריק, קיבולו:

$$C_1 = C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

אם כך, קיבולו של קבל 2 הנו:

$$C_2 = \epsilon_r C_0 = 5C_0$$

מקטינים את המרחק בין לוחות קבל 1 פי 5, כלומר, המרחק בין הלוחות קבל 1 כעת הינו $d_1 = 0.2d$.

2. קבעו האם קיבול קבל 1 כעת, גדול, קטן או שווה לקיבול קבל 2. הסבירו את קביעתכם.

הסבר:

מנוסחת קיבול של קבל לוחות עם ריק בין הלוחות: $C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$.

אם כך, הקטנת המרחק בין הלוחות גורם להגדלת הקיבול.

נציב את הביטוי למרחק החדש בין לוחות קבל 1:

$$C_1 = \epsilon_0 \frac{A}{d_1} = \epsilon_0 \frac{A}{0.2d} = 5\epsilon_0 \frac{A}{d} = 5C_0$$

קיבלנו ביטוי זהה לקיבול קבל 2.

3. נסמן ב- V את מתח מקור המתח שטען את הקבלים הנתונים בהתחלה. בטאו, באמצעות V , את המתח V_1 בין לוחות קבל 1 לאחר קירוב הלוחות. הסבר:

מהגדרת הקיבול של קבל כיחס בין מטענו למתח בין מוליכיו מקבלים:

$$V = \frac{Q}{C}$$

נתון שהקבל מנותק ממקור המתח בזמן קירוב הלוחות, לכן מטען הקבל לא משתנה. מצד אחר, בסעיף הקודם הוכחנו שקירוב הלוחות גרם להגדלת הקיבול פי 5. לפי כך מסיקים שהמתח קטן פי 5, כלומר:

$$V_1 = \frac{1}{5}V = 0.2V$$

כאשר עוצמת השדה החשמלי בתחום בין לוחות הקבל גדולה מאוד, יתכן מצב בו יעבור מטען חשמלי מלוח אחד לשני ישירות דרך המרחב שבין הלוחות וכך הקבל נפרק ממטענו. אומרים שחלה "פריצה" של הקבל.

עוצמת שדה גדולה זו מתגברת על התווך בין הלוחות, בין אם הוא ריק או תווך מבודד אחר. לכל תווך עוצמת שדה מזערית ממנה והלאה תתרחש פריצת קבל:

- עבור ריק, כאשר עוצמת השדה החשמלי גדולה מ: $E = 3 \cdot 10^4 V/m$ מתרחשת פריצה.
- עבור זכוכית, כאשר עוצמת השדה החשמלי גדולה מ: $E = 1 \cdot 10^7 V/m$ מתרחשת פריצה.

נתון שבהתחלה המרחק בין הלוחות של כל קבל היה $d = 0.75mm$ ומתח מקורות המתח שטענו את הקבלים היה $V = 6kV$.

בקבל 1 בין לוחות ריק וקיבולו הינו הקיבול לאחר קירוב הלוחות. קבעו עבור כל קבל האם תתרחש בו פריצה או לא. הסבירו.

הסבר:

נחשב את עוצמת השדה החשמלי בכל קבל בעזרת הנוסחה של גודל השדה החשמלי בין לוחות קבל:

$$E = \frac{V}{d}$$

עבור קבל 1:

$$E_1 = \frac{V_1}{d_1} = \frac{0.2V}{0.2d} = \frac{V}{d} = \frac{6,000}{0.75 \cdot 10^{-3}} = 8 \cdot 10^6 V/m$$

מאחר שעוצמת שדה זאת גדולה מעוצמת השדה המינימלית עבור פריצת קבל שבין לוחותיו ריק, בקבל 1 כן תתרחש פריצה.

$$E_2 = \frac{V}{d} = E_1 = 8 \cdot 10^6 V/m$$

עבור קבל 2: $E_2 = \frac{V}{d} = E_1 = 8 \cdot 10^6 V/m$ מאחר שעוצמת שדה זאת קטנה מעוצמת השדה המינימלית עבור פריצת קבל שבין לוחותיו זכוכית, בקבל 2 לא תתרחש פריצה.

תרגיל מספר 16

נתון קבל לוחות טעון, ששטח לוחותיו $A = 10\text{cm}^2$ והמרחק ביניהם $d = 2\text{mm}$.

מטען הקבל $Q = 400\text{nC}$.

הקבל מנותק ממקור המתח ששימש לטעינתו.

1. מהו קיבול הקבל?

הסבר:

נוסחת הקיבול של קבל לוחות:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} = 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{10 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-3}} = 4.425 \cdot 10^{-12} \text{F}$$

2. מהי עוצמת השדה בתחום בין הלוחות?

הסבר:

עוצמת השדה בין לוחות הקבל:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 A} = \frac{400 \cdot 10^{-9}}{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 10 \cdot 10^{-4}} = 4.52 \cdot 10^7 \text{N/C}$$

מכניסים בין הלוחות חומר מבודד בעל קבוע דיאלקטרי $\epsilon_r = 2$, כך שהחומר ממלא את כל הנפח בין הלוחות.

3. מהו כעת מטען הקבל?

הסבר:

מאחר שהקבל מנותק ממקור המתח, מטען הקבל נשאר כפי שהיה לפני הכנסת החומר המבודד.

4. קיבעו מהו המשפט הנכון, בעקבות הכנסת החומר המבודד:

(1) השדה החשמלי בתחום בין לוחות הקבל גדל פי 2.

(2) השדה החשמלי בתחום בין לוחות הקבל אינו משתנה.

(3) השדה החשמלי בתחום בין לוחות הקבל קטן פי 2.

(4) השדה החשמלי בתחום בין לוחות הקבל קטן פי 4.

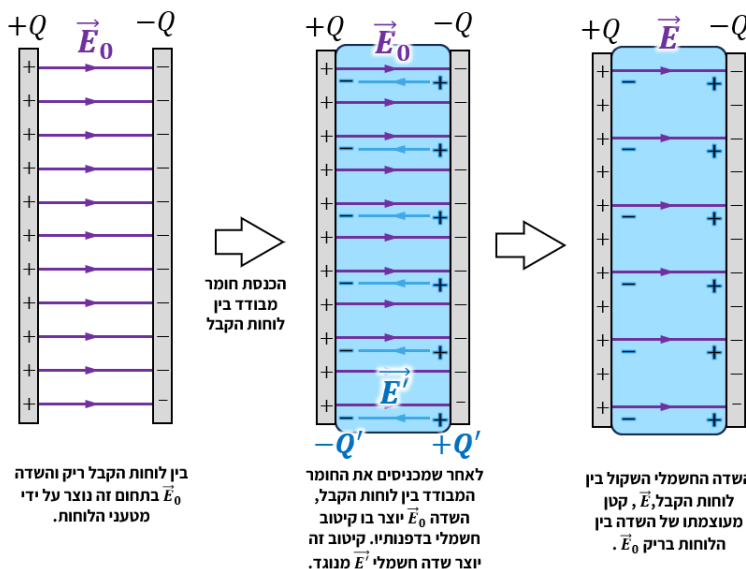
הסבר:

בהכנסת החומר המבודד בין לוחות קבל גורם להקטנת עוצמת השדה החשמלי.

הדבר נובע מכך שהשדה החשמלי הנוצר על ידי מטעני הלוחות יוצר קיטוב חשמלי בחומר

המבודד.

קיטוב זה יוצר שדה חשמלי נוסף (שדה מושרה) המנוגד בכיוונו לשדה החשמלי הנוצר על ידי מטעני הלוחות. לכן, השדה החשמלי השקול של שני שדות אלו קטן יותר מהשדה החשמלי שהיה טרם הכנסת החומר המבודד.



תרגיל מספר 17

נתון קבל לוחות הנטען על ידי מקור מתח. לאחר גמר הטעינה, בעוד הקבל מחובר למקור המתח, ממלאים את נפח הקבל בתחום בין הלוחות בחומר מבודד בעל קבוע דיאלקטרי $\epsilon_r = 4$. בעקבות הכנסת החומר המבודד, קבעו מה קורה לכל אחד מהערכים הבאים בטבלה הבאה.

	גדל פי 4	לא משתנה	קטן פי 4	אי אפשר לדעת
קיבול הקבל				
מתח הקבל				
מטען הקבל				
עוצמת השדה בתחום בין לוחות הקבל				

הסבר:

1. לפי הנוסחה לחישוב קיבול של קבל לוחות:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

רואים שקיים יחס ישר בין קיבול הקבל לקבוע הדיאלקטרי ϵ_r . היות והמקדם הדיאלקטרי גדול מ-1, הקיבול עם החומר המבודד גדל פי ϵ_r .

2. היות והקבל נשאר מחובר למקור המתח, המתח בין לוחותיו לא משתנה.

3. מטען הקבל הנו המכפלה של קיבול הקבל במתח בין לוחותיו: $Q = CV$. הקיבול גדל והמתח לא משתנה, לכן מסיקים שמטען הקבל גדל ביחס ישר לקיבול.

4. עוצמת (גודל) השדה בתחום בין לוחות הקבל לא משתנה. גודל השדה בין לוחות קבל:

$$E = \frac{V}{d}$$

מאחר שהמתח לא משתנה וגם המרחק בין הלוחות לא משתנה, עוצמת השדה נשארת כפי שהייתה.

האנרגיה האגורה בקבל טעון

תרגיל מספר 18

נתון קבל לא טעון שקיבולו $C = 6nF$.

מחברים את הקבל למקור מתח אידיאלי $V = 12V$ וממתינים עד גמר טעינתו.

1. מהו מטען הקבל הטעון?

הסבר:

מהגדרת הקיבול של קבל:

$$C = \frac{Q}{V} \rightarrow Q = C \cdot V = 6 \cdot 10^{-9} \cdot 12 = 72 \cdot 10^{-9} = 72nC$$

2. מהי האנרגיה החשמלית האגורה בקבל הטעון?

הסבר:

מנוסחת האנרגיה האגורה בקבל טעון:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \cdot 6 \cdot 10^{-9} \cdot 12^2 = 4.32 \cdot 10^{-7} J$$

3. אם היינו טוענים את הקבל בעזרת מקור מתח אחר, שהמתח שלו גדול פי 2, חשבו את האנרגיה

האגורה בקבל במקרה זה?

הסבר:

מהנוסחה לאנרגיה האגורה בקבל טעון ניתן לראות כי בין האנרגיה למתח יחס ריבועי (כי הקיבול קבוע). לכן אם המתח גדל פי 2, האנרגיה תגדל פי 4.

$$U^* = 4 \cdot U = 4 \cdot 4.32 \cdot 10^{-7} = 17.28 \cdot 10^{-7} J$$

דרך פתרון נוספת – חישוב ישיר:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \cdot 6 \cdot 10^{-9} \cdot 24^2 = 17.28 \cdot 10^{-7} J$$

4. אם היינו טוענים קבל אחר, בעזרת אותו מקור מתח $V = 12V$, אבל לאחר הטעינה האנרגיה

האגורה בקבל זה הייתה $U = 1.44 \cdot 10^{-7} J$, מהו קיבולו של קבל זה?

הסבר:

מנוסחת האנרגיה האגורה בקבל טעון:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 \rightarrow C = \frac{2U}{V^2} = \frac{2 \cdot 1.44 \cdot 10^{-7}}{12^2} = 2 \cdot 10^{-9} F = 2nF$$

תרגיל מספר 19

קבל לוחות מורכב משני לוחות ריבועיים בעלי אורך צלע $L = 10\text{cm}$, המרוחקים $d = 1\text{mm}$ זה מזה, כאשר בתחום בין הלוחות ריק. טוענים את הקבל בעזרת מקור מתח אידיאלי $V = 150\text{V}$.

1. חשבו את קיבול הקבל.

הסבר:

נציב את הערכים המספריים בנוסחה לחישוב קיבול קבל לוחות:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} = 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{0.1^2}{1 \cdot 10^{-3}} = 88.5 \cdot 10^{-12} \text{F}$$

2. חשבו את האנרגיה האגורה בקבל.

הסבר:

מנוסחת האנרגיה האגורה בקבל טעון:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \cdot 88.5 \cdot 10^{-12} \cdot 150^2 \approx 9.96 \cdot 10^{-7} \text{J}$$

בגמר טעינת הקבל מנתקים אותו ממקור המתח ומקרבים את הלוחות.

3. קבעו עבור כל אחד מהגדלים הבאים האם הוא גדל, קטן או לא משתנה:

(1) קיבול הקבל.

(2) מטען הקבל.

(3) מתח הקבל.

(4) האנרגיה האגורה בקבל.

הסבירו את קביעתכם.

הסבר:

(1) מהנוסחה לחישוב קיבול קבל לוחות: $C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$

מאחר וקיים יחס הפוך בין קיבול הקבל למרחק בין הלוחות, הקטנת המרחק בין הלוחות גורם להגדלת הקיבול.

(2) מאחר שמקור המתח מנותק, מטען הקבל נשאר כפי שהיה.

(3) מהגדרת הקיבול של קבל:

$$C = \frac{Q}{V} \rightarrow V = \frac{Q}{C}$$

מטען הקבל לא משתנה, אך קיבולו גדל. מכאן שמתח הקבל קטן.

(4) נוסחת האנרגיה האגורה בקבל טעון: $U = \frac{1}{2} CV^2$

נבטא את האנרגיה של הקבל בעזרת מטענו והמתח בין לוחותיו.

הגדרת הקיבול של קבל: $C = \frac{Q}{V}$, לכן:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q}{V} \cdot V^2 = \frac{1}{2} QV$$

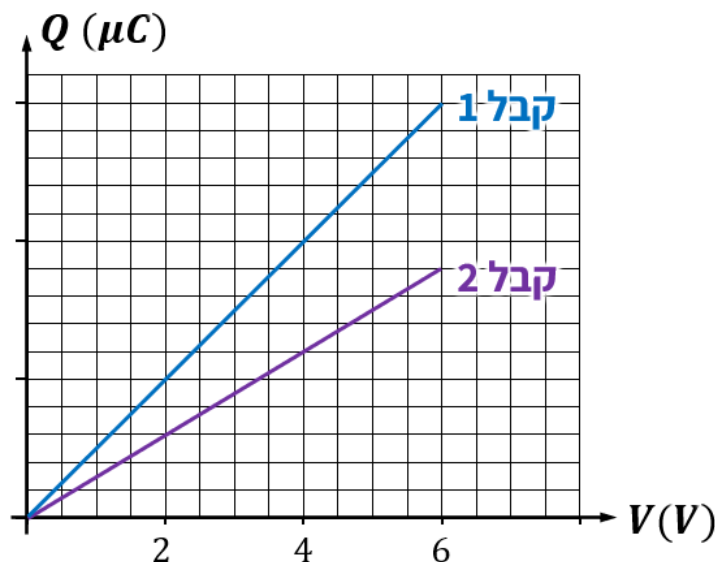
מאחר שהמטען לא משתנה, אך ומתח קטן, מבינים שהאנרגיה האגורה בקבל קטנה.

תרגיל מספר 20

נתונים שני קבלים, קבל 1 וקבל 2, שאינם טעונים.

את כל אחד משני הקבלים מחברים למקור מתח V וממתינים עד גמר טעינתם.

נתון גרף המתאר את מטען כל אחד מהקבלים כתלות במתח בין לוחותיו במהלך טעינתו, עד סיום הטעינה.



1. קבעו האם קיבול קבל 1 גדול, קטן או שווה לקיבולו של קבל 2. הסבירו את קביעתכם.
הסבר:

שיפוע הגרף המתאר את מטען הקבל כתלות במתח בין מוליכיו מייצג את קיבול הקבל, כי הגדרת

$$C = \frac{Q}{V}$$

מאחר ששיפועו של גרף קבל 1 גדול יותר, קיבולו של קבל זה גדול יותר.

נתון שהאנרגיה החשמלית האגורה בקבל 1 בסיום טעינתו היא $U = 45 \mu J$.

2. חשבו את המטען של קבל 1 בסיום טעינתו.

הסבר:

ה"שטח" הכלוא בין הגרף הנתון לציר האופקי מייצג את האנרגיה של הקבל.

מהגרף נוכל להסיק כי בסוף הטעינה מתח הקבל $6V$. לכן נקבל:

$$U = \frac{Q \cdot V}{2} \rightarrow Q_1 = \frac{2U_1}{V} = \frac{2 \cdot 45 \cdot 10^{-6}}{6} = 15 \cdot 10^{-6} C = 15 \mu C$$

אפשרות אחרת לחישוב היא בעזרת הנוסחה לחישוב האנרגיה האגורה בקבל:

$$U_1 = \frac{1}{2} C_1 V^2 = \frac{1}{2} Q_1 V \rightarrow Q_1 = \frac{2U_1}{V}$$

נציב את הערכים המספריים:

$$Q_1 = \frac{2 \cdot 45 \cdot 10^{-6}}{6} = 15 \cdot 10^{-6} C = 15 \mu C$$

3. חשבו את הקיבול של קבל 1.

הסבר:

שיפוע הגרף מייצג את קיבול הקבל.

נבחר שתי נקודות על הגרף של קבל 1 ונחשב את שיפועו – הנקודה $(6V, 15\mu C)$ וראשית הצירים. נקבל:

$$C_1 = \frac{15 \cdot 10^{-6} - 0}{6 - 0} = 2.5 \cdot 10^{-6} F = 2.5\mu F$$

דרך פתרון נוספת - חישוב ישיר מהגדרת הקיבול:

$$C_1 = \frac{Q}{V} = \frac{15 \cdot 10^{-6}}{6} = 2.5 \cdot 10^{-6} F = 2.5\mu F$$

4. חשבו את האנרגיה החשמלית האגורה בקבל 2 בסוף טעינתו.

הסבר:

ה"שטח" הכלוא בין הגרף הנתון לציר האופקי מייצג את האנרגיה של הקבל. על פי התוצאה שקיבלנו בסעיף 2 של תרגיל זה יכולים להסיק מהם הערכים בציר האנכי של הגרף – מטען הקבל. מבינים כי מטענו של קבל 2 בסיום טעינתו הוא $Q_2 = 9\mu C$. לכן נקבל:

$$U_2 = \frac{Q \cdot V}{2} = \frac{9 \cdot 10^{-6} \cdot 6}{2} = 27 \cdot 10^{-6} J = 27\mu J$$

דרך פתרון נוספת – חישוב ישיר, בעזרת נוסחת האנרגיה האגורה בקבל:

$$U_2 = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} Q V$$

שזאת למעשה בדיוק אותה נוסחה בה השתמשנו לחישוב השטח מתחת לגרף.

דרך פתרון נוספת – יחס בין גדלים:

אנרגיית הקבל נמצא ביחס ישר למטענו, כאשר המתח קבוע.

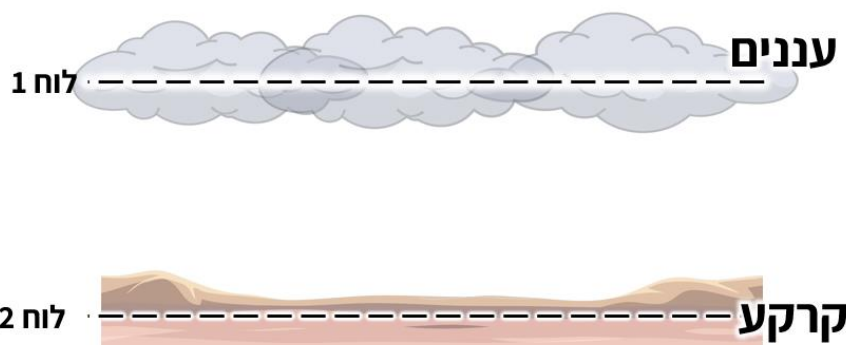
לפי הגרף, המתח של שני הקבלים שווה, בעוד שהיחס בין מטען קבל 2 למטען קבל 1 הוא 0.6.

לכן זהו גם היחס בין האנרגיה של קבל 2 לבין האנרגיה של קבל 1:

$$\frac{U_2}{U_1} = 0.6 \rightarrow U_2 = 0.6 \cdot U_1 = 0.6 \cdot 45 \cdot 10^{-6} = 27 \cdot 10^{-6} J = 27\mu J$$

תרגיל מספר 21

בעת סופת רעמים נמצא כי בין שכבת העננים לקרקע נוצר שדה חשמלי אנכי שעוצמתו $E = 3,000 \text{ N/C}$. אפשר לתאר את השדה החשמלי על פי מודל פשוט של קבל לוחות מקבילים, כמתואר בתרשים.



1. חשבו את המתח הנוצר בין העננים לקרקע, אם הם נמצאים בגובה $H = 400 \text{ m}$ מעל פני הקרקע. הסבר:

מנוסחת השדה בין לוחות קבל:

$$E = \frac{V}{d} \rightarrow V = E \cdot d$$

נציב את הערכים המספריים:

$$V = E \cdot d = 3,000 \cdot 400 = 1.2 \cdot 10^6 \text{ V}$$

2. לפי המודל הפשוט של קבל לוחות, כאשר נוצר ברק, הדבר שקול לפריצת קבל ופריקתו. נתון כי במהלך ברק במערכת זו, עוברת בין שכבת העננים לקרקע כמות מטען של $Q = 60 \text{ C}$. חשבו את קיבול מערכת העננים והקרקע. הסבר:

מהגדרת הקיבול של קבל:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{60}{1.2 \cdot 10^6} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ F} = 50 \mu\text{F}$$

3. חשבו את האנרגיה החשמלית המשתחררת על ידי ברק זה בין העננים לקרקע. הניחו כי כל מטען הקבל נפרק על ידי הברק. הסבר:

מנוסחת האנרגיה האגורה בקבל:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \cdot 50 \cdot 10^{-6} \cdot (1.2 \cdot 10^6)^2 = 36 \cdot 10^6 \text{ J}$$

תרגיל מספר 22

קיבולו של קבל $C = 2nF$ והמרחק בין לוחותיו הוא $d = 2mm$.

חיברו לקבל זה מקור מתח $V = 150V$ ולאחר גמר הטעינה ניתקו את המקור.

1. חשבו את מטען הקבל.

הסבר:

מהגדרת הקיבול של קבל:

$$C = \frac{Q}{V} \rightarrow Q = C \cdot V = 2 \cdot 10^{-9} \cdot 150 = 300 \cdot 10^{-9} C = 300nC$$

2. הכוחות שהלוחות מפעילים זה על זה:

(1) הלוחות לא מפעילים כוחות זה על זה.

(2) הלוחות מפעילים זה על זה כוחות משיכה.

(3) הלוחות מפעילים זה על זה כוחות דחייה.

(4) על הלוחות פועלים כוחות באותו כיוון.

הסבר:

שני הלוחות טעונים במטען חשמלי השווה בגודלו ומנוגד בסימנו, לכן הם מפעילים זה על זה כוחות משיכה חשמליים.

3. חשבו את האנרגיה האגורה הקבל.

הסבר:

מנוסחת האנרגיה האגורה בקבל טעון:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 10^{-9} \cdot 150^2 = 2.25 \cdot 10^{-5} J$$

בעוד מקור המתח מנותק, מרחיקים את הלוחות למרחק גדול פי 2.

4. חשבו את האנרגיה האגורה הקבל.

הסבר:

נוסחת האנרגיה האגורה בקבל: $U = \frac{1}{2} CV^2$

נבטא את האנרגיה הזאת בעזרת המטען והקיבול.

מנוסחת ההגדרה של קיבול קבל מקבלים ביטוי המטח בין לוחות הקבל: $V = \frac{Q}{C}$. לכן:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \left(\frac{Q}{C}\right)^2 = \frac{Q^2}{2C}$$

נוסחת הקיבול של קבל לוחות: $C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$

רואים שקיבול הקבל נמצא ביחס הפוך למרחק בין הלוחות, כך שאם המרחק בין הלוחות גדל פי 2, הקיבול קטן פי 2, ולכן:

$$C^* = \frac{C}{2} = \frac{2nF}{2} = nF = 1 \cdot 10^{-9} F$$

מקור המתח מנותק ולכן מטען הקבל נשאר כפי שהיה לפני הרחקת הלוחות. נציב את הערכים המספרים:

$$U^* = \frac{(300 \cdot 10^{-9})^2}{2 \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = 4.5 \cdot 10^{-5} J$$

הערה:

קיבלנו שעתה האנרגיה בקבל כפולה מזאת שהייתה לפני הרחקת הלוחות, $U^* = 2U$. נציג כאן הסבר מילולי לתוצאה זאת.

מנוסחת הקיבול של קבל לוחות מבינים שכאשר המרחק בין הלוחות גדל פי 2, קיבול הקבל קטן פי 2. ומנוסחת האנרגיה העצורה בקבל כתלות במטען ובקיבול רואים שהאנרגיה ביחס הפוך לקיבול במקרה שהמטען לא משתה. אז אם הקיבול קטן פי 2 האנרגיה גדלה פי 2. מקור התוספת באנרגיה החשמלית האגורה בקבל הוא העבודה שנעשתה בהרחקת הלוחות.

5. חשבו את העבודה שמבצע גורם חיצוני בהרחקת הלוחות. הסבר:

מאחר שמקור המתח מנותק, עבודת הגורם החיצוני בהרחקת הלוחות שווה לשינוי באנרגיה הקבל.

$$W_{ext} = \Delta U = U_f - U_i = 4.5 \cdot 10^{-5} - 2.25 \cdot 10^{-5} = 2.25 \cdot 10^{-5} J$$

6. השלימו את המשפט:

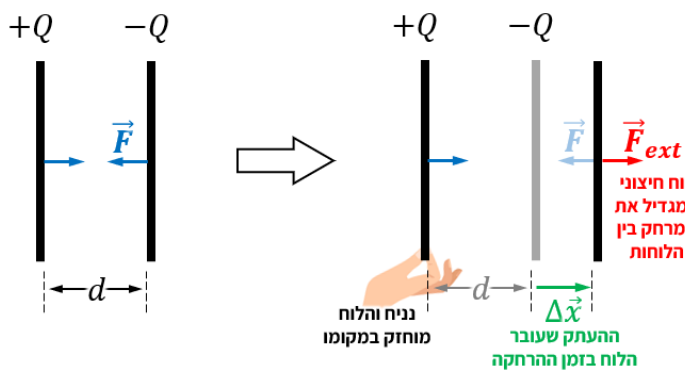
"לאחר הרחקת הלוחות האנרגיה האגורה בקבל גדלה, לכן השינוי באנרגיה הקבל חיובי. דבר זה מעיד על כך שנדרשה עבודה חיובית בהרחקת הלוחות. וזה כמוהו מסתדר עם העובדה שבין הלוחות פועל כוח משיכה חשמלי ולכן בהרחקת הלוחות זה מזה נדרש כוח חיצוני נגד כיוון כוחות משיכה הדדיים אלו".

הסבר:

כפי שהוסבר בסעיף 2, לוחות מפעילים זה על זה כוחות משיכה חשמליים.

לכן, על מנת להרחיק לוח אחד מלוח אחר על גורם החיצוני להפעיל כוח המנוגד לכוח החשמלי הפועל עליו, וכיוונו עם כיוון ההרחקה של הלוח. העבודה של הכוח החיצוני הפועל לאורך ההעתק שעובר הלוח היא חיובית, לכן עבודת הגורם החיצוני חיובי.

עבודת הגורם החיצוני שווה לשינוי באנרגיה של הקבל (מקור המתח מנותק ולכן אינו מבצע עבודה בתהליך), לכן שינוי האנרגיה חיובי, מה שאומר לנו שהאנרגיה של הקבל לאחר הרחקת הלוחות גדולה יותר מהאנרגיה של הקבל במצבו ההתחלתי.



תרגיל מספר 23

קיבולו של קבל $C_0 = 2nF$, בין לוחותיו ריק והמרחק בין הלוחות הוא $d = 2mm$.
חיברו לקבל מקור מתח $V = 150V$ ולאחר גמר טעינת הקבל מנתקים אותו.
לאחר הניתוק מכניסים בין לוחות הקבל חומר מבודד בעל קבוע דיאלקטרי יחסי $\epsilon_r = 5$.

בסעיפים 1 – 4 שלהלן נדרש חישוב ארבעה מאפיינים של הקבל לאחר הכנסת החומר המבודד.
1. חשבו את מטען הקבל.

הסבר:

נחשב תחילה את מטען הקבל טרם הכנסת החומר המבודד, מהקשר בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין מוליכיו:

$$Q = C_0 \cdot V = 2 \cdot 10^{-9} \cdot 150 = 300 \cdot 10^{-9} C = 300nC$$

מאחר שהחומר המבודד הוכנס בין לוחות הקבל אחרי ניתוקו ממקור המתח, מטען הקבל נשאר כפי שהיה גם אחרי הכנסת החומר המבודד.

2. מהו מתח הקבל?

הסבר:

מנוסחת הקיבול של קבל לוחות: $C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$.
כאשר מכניסים חומר מבודד בין לוחות קבל, קיבולו גדל פי ϵ_r .
לכן, לאחר הכנסת החומר המבודד, קיבול הקבל:

$$C = \epsilon_r C_0 = 5 \cdot 2 \cdot 10^{-9} = 10nF$$

מהקשר בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין מוליכיו:

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{300 \cdot 10^{-9}}{10 \cdot 10^{-9}} = 30V$$

3. מהו גודל השדה החשמלי בתחום בין לוחות הקבל?

הסבר:

גודל השדה החשמלי בין לוחות קבל:

$$E = \frac{V}{d}$$

נציב את הערכים המספריים:

$$E = \frac{V}{d} = \frac{30}{2 \cdot 10^{-3}} = 15,000 N/C$$

4. חשבו את האנרגיה האגורה בקבל.

הסבר:

האנרגיה האגורה בקבל:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 30^2 = 4.5 \cdot 10^{-6} J = 4.5\mu J$$

5. חשבו את העבודה שמבצע גורם חיצוני בהכנסת החומר המבודד בין לוחות הקבל.

הסבר:

מאחר שמקור המתח מנותק, עבודת הגורם החיצוני בהכנסת החומר המבודד בין הלוחות שווה לשינוי באנרגיה החשמלית האגורה בקבל.

$$W_{ext} = \Delta U = U_f - U_i$$

נחשב את האנרגיה האגורה בקבל בסיום טעינתו, אך טרם הכנסת החומר המבודד:

$$U_i = \frac{1}{2} C_0 V^2 = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 10^{-9} \cdot 150^2 = 2.25 \cdot 10^{-5} J$$

נציב:

$$W_{ext} = 4.5 \cdot 10^{-6} - 2.25 \cdot 10^{-5} = -1.8 \cdot 10^{-5} J$$

כאשר חומר מבודד נכנס בין לוחות קבל, נוצר בין דפנותיו (שבתוך הקבל כבר) קיטוב חשמלי על ידי השדה החשמלי של מטעני הלוחות הקבל. קיטוב זה הפוך בקוטביות לזה של לוחות הקבל (הדופן של החומר המבודד הקרובה ללוח הקבל הטעון חיובית היא בעלת עודף מטען שלילי, והדופן של החומר המבודד הקרובה ללוח הקבל הטעון שלילית היא בעלת עודף מטען חיובי). לכן פועלים כוחות משיכה בין לוחות הקבל לחומר המבודד.

אם כך, כניסתו של החומר המבודד לתוך קבל יגרום להגדלת מהירותו בכניסה, דבר שיגרום לו לצאת מהקבל מצידו השני. ולכן יש להכניס את החומר המבודד באיטיות לקבל.

בעקבות זאת, על מנת להכניס חומר מבודד בקבל,

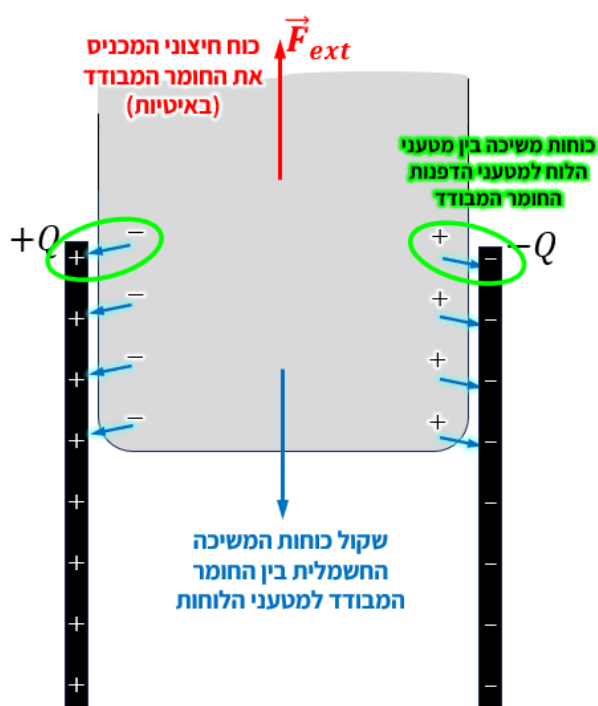
על כוח חיצוני להפעיל כוח במנוגד לכוחות

המשיכה, ועבודתו שלילית.

עבודת הכוח החיצוני שווה לשינוי באנרגיה הקבל

(מקור המתח מנותק במקרה זה) ולכן השינוי

באנרגיה הקבל שלילית.



תרגיל מספר 24

נתון קבל לוחות בעל קיבול חשמלי $C = 2nF$.

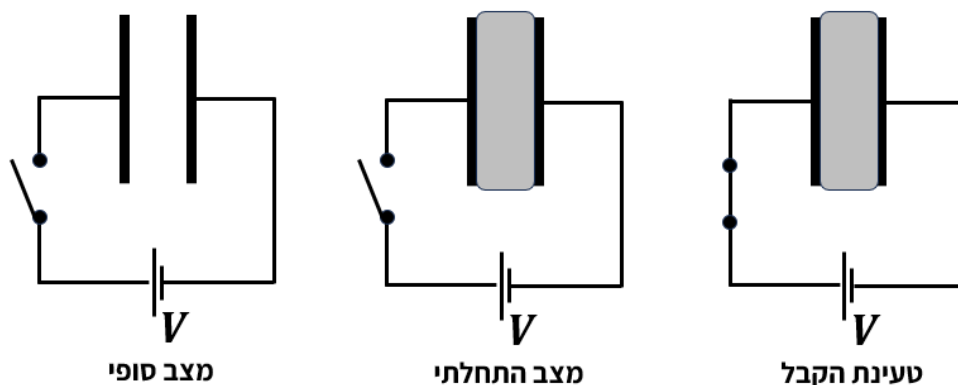
הקבל מלא בכל נפחו בחומר מבודד בעל קבוע דיאלקטרי יחסי $\epsilon_r = 2.5$.

מחברים את הקבל למקור מתח $V = 150V$ ולאחר גמר טעינתו מנתקים אותו ממקור המתח.

נקרא למצב זה "מצב התחלתי".

לאחר ניתוק הקבל ממקור המתח, מוציאים את החומר המבודד מבין הלוחות.

נקרא למצב זה "מצב סופי".



1. מלאו את הערכים שבטבלה עבור המצב ההתחלתי ועבור המצב הסופי:

מצב סופי	מצב התחלתי	
0.8	2	קיבול הקבל ($nF = 10^{-9}F$)
375	150	מתח הקבל (V)
300	300	מטען הקבל ($nC = 10^{-9}C$)
5.625	2.25	האנרגיה האגורה בקבל ($10^{-5}J$)

הסבר:

מצב סופי (f - final)	מצב התחלתי (i - initial)	
בהוצאת החומר המבודד, קיבול הקבל קטן פ' ϵ_r : $C_f = \frac{2nF}{2.5} = 0.8nF$	קיבול הקבל נתון בתרגיל: $C_i = 2nF$	קיבול הקבל ($nF = 10^{-9}F$)
מהקשר בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין לוחותיו: $V_f = \frac{Q_f}{C_f} = \frac{300}{0.8} = 375V$	מתח הקבל נתון בתרגיל והוא מתח מקור המתח הטוען את הקבל: $V_i = 150V$	מתח הקבל (V)
מקור המתח מנותק בזמן הוצאת החומר המבודד, לכן מטען הקבל לא משתנה: $Q_f = Q_i = 300nC$	מהקשר בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין לוחותיו: $Q_i = C_i \cdot V_i = 300nC$	מטען הקבל ($nC = 10^{-9}C$)
מנוסחת החישוב של אנרגיית הקבל: $U_f = \frac{1}{2} C_f V_f^2 = 5.625 \cdot 10^{-5}J$	מנוסחת חישוב של אנרגיית הקבל: $U_i = \frac{1}{2} C_i V_i^2 = 2.25 \cdot 10^{-5}J$	האנרגיה האגורה בקבל ($10^{-5}J$)

2. השלימו את המשפט:

"לאחר הוצאת החומר המבודד מבין לוחות הקבל, האנרגיה האגורה בקבל גדלה, לכן מבינים שהשינוי באנרגיית הקבל חיובי. זה מעיד על כך שכוח חיצוני עשה עבודה חיובית במהלך הוצאת החומר המבודד.

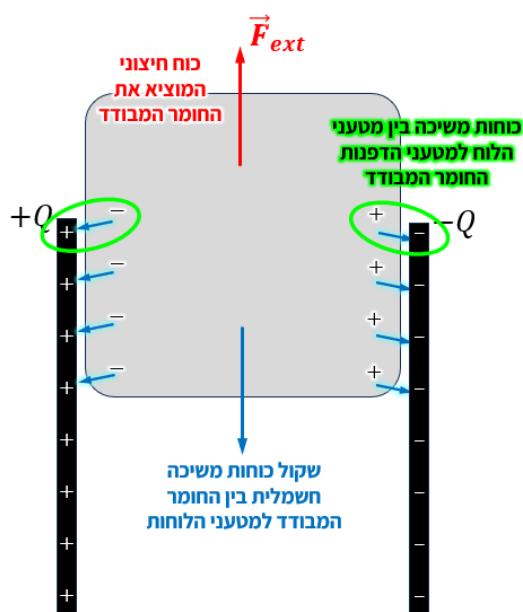
דבר זה כמובן מסתדר עם העובדה שבין שכבת החומר המבודד ללוחות הקבל פועלים כוחות משיכה, וכתוצאה מכך, גורם חיצוני צריך לבצע עבודה חיובית כדי להוציא את החומר המבודד".

הסבר:

כאשר חומר מבודד נמצא בין לוחות קבל, נוצר בין דפנותיו קיטוב חשמלי על ידי השדה החשמלי של מטעני

לוחות הקבל. קיטוב זה הפוך בקוטביות לזה של לוחות הקבל (הדופן של החומר המבודד הקרובה ללוח הקבל הטעון חיובית היא בעלת עודף מטען שלילי, והדופן של החומר המבודד הקרובה ללוח הקבל הטעון שלילית היא בעלת עודף מטען חיובי). לכן פועלים כוחות משיכה בין לוחות הקבל לחומר המבודד.

בעקבות זאת, על מנת להוציא חומר מבודד מקבל, על גורם חיצוני לאלץ את החומר לצאת – לבצע עבודה חיובית במנוגד לכוחות המשיכה. עבודת הגורם החיצוני שווה לשינוי באנרגיית הקבל (מקור המתח מנותק במקרה זה) ולכן השינוי באנרגיית הקבל חיובית.



תרגיל מספר 25

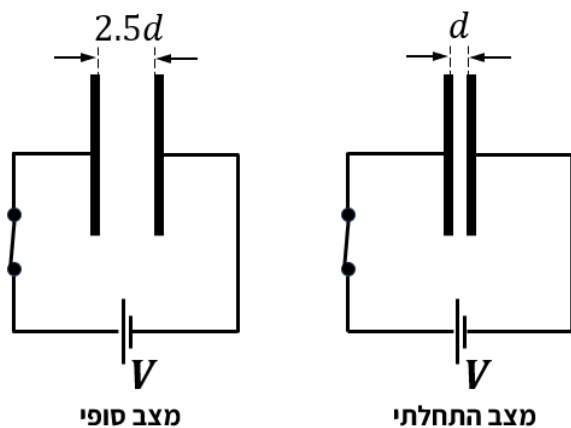
נתון קבל לוחות בעל קיבול חשמלי $C = 2nF$.

מחברים את הקבל למקור מתח $V = 150V$ וממתינים לגמר טעינת הקבל.

מצב זה מוגדר "מצב התחלתי".

משאירים את מקור המתח מחובר ומרחיקים את הלוחות למרחק הגדול פי 2.5.

מצב זה מוגדר "מצב סופי".



1. מלאו את הערכים שבטבלה עבור המצב ההתחלתי ועבור המצב הסופי:

מצב סופי	מצב התחלתי	
0.8	2	קיבול הקבל ($nF = 10^{-9}F$)
150	150	מתח הקבל (V)
100	300	מטען הקבל ($nC = 10^{-9}C$)
0.9	2.25	האנרגיה האגורה בקבל ($10^{-5}J$)

הסבר:

מצב סופי (f – final)	מצב התחלתי (i – initial)	
הרחקת הלוחות פי 2.5 תגרום להקטנת הקיבול פי 2.5: $C_f = \frac{2nF}{2.5} = 0.8nF$	קיבול הקבל נתון בתרגיל: $C_i = 2nF$	קיבול הקבל ($nF = 10^{-9}F$)
מקור המתח מחובר ולכן המתח בין לוחות הקבל לא משתנה: $V_f = V_i = 150V$	מתח הקבל נתון בתרגיל והוא מתח מקור המתח הטוען את הקבל: $V_i = 150V$	מתח הקבל (V)
מהקשר בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין לוחותיו: $Q_f = C_f \cdot V_f = 120nC$	מהקשר בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין לוחותיו: $Q_i = C_i \cdot V_i = 300nC$	מטען הקבל ($nC = 10^{-9}C$)
מנוסחת החישוב של אנרגיית הקבל: $U_f = \frac{1}{2}C_fV_f^2 = 0.9 \cdot 10^{-5}J$	מנוסחת האנרגיה של קבל: $U_i = \frac{1}{2}C_iV_i^2 = 2.25 \cdot 10^{-5}J$	האנרגיה האגורה בקבל ($10^{-5}J$)

2. חשבו את השינוי באנרגיית הקבל בעקבות הרחקת הלוחות.

הסבר:

השינוי באנרגיית הקבל, מהתשובות שקיבלנו בסעיף הקודם, הוא:

$$\Delta U = U_f - U_i = 0.9 \cdot 10^{-5} - 2.25 \cdot 10^{-5} = -1.35 \cdot 10^{-5}J$$

3. חשבו את עבודת המקור במהלך הרחקת הלוחות.

הסבר:

במהלך הרחקת הלוחות עוברת דרך מקור המתח כמות מטען ΔQ , השווה לשינוי במטען הקבל. לכן עבודת מקור המתח הינה:

$$W_s = V \cdot \Delta Q$$

נציב את הערכים המספריים (תוצאות סעיף 1):

$$W_s = 150 \cdot (120 \cdot 10^{-9} - 300 \cdot 10^{-9}) = -2.7 \cdot 10^{-5}J$$

4. חשבו את עבודת הכוח החיצוני בהרחקת הלוחות.

הסבר:

סכום עבודת הכוח החיצוני ועבודת מקור המתח שווה לשינוי באנרגיית הקבל:

$$W_{ext.} + W_s = \Delta U$$

נציב את התוצאות שקיבלנו בסעיפים הקודמים:

$$W_{ext.} + (-2.7 \cdot 10^{-5}) = -1.35 \cdot 10^{-5} \rightarrow W_{ext.} = 1.35 \cdot 10^{-5}J$$

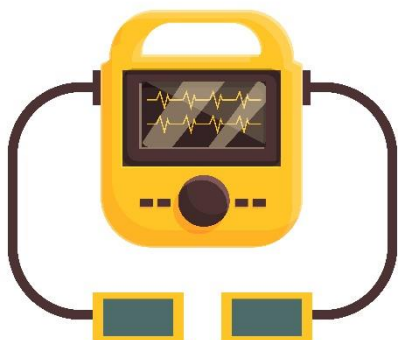
5. השלימו את המשפט:

"בהרחקת הלוחות הכוח החיצוני מבצע עבודה חיובית שהרי הלוחות מפעילים זה על זה כוחות משיכה. אבל, קיבלנו כי שינוי האנרגיה האגורה בקבל שלילית. הדבר נובע מכך שהכוח החיצוני הוא לא הגורם היחידי המבצע עבודה. גורם נוסף המבצע עבודה הוא מקור המתח אשר במקרה זה הוא מבצע עבודה שלילית, זאת כי מטען הקבל קטן במהלך הרחקת הלוחות וזה אומר שחלק מהמטען שהיה באחד מלוחות הקבל עובר דרך מקור המתח וחוזר ללוח השני".

הסבר:

הלוחות מפעילים כוחות משיכה זה על זה, לכן, על מנת להרחיק את הלוחות, על הגורם החיצוני להפעיל כוח המנוגד לכוחות אלו, כלומר כיוונו עם כיוון ההרחקה של הלוחות. עבודה של כוח הפועל על גוף בכיוון ההעתק של הגוף היא חיובית, לכן עבודת הכוח החיצוני חיובי. אבל, כאשר הקבל נשאר מחובר למקור המתח, מצד אחד מתח הקבל נשאר קבוע, אבל הקיבול קטן עקב הרחקת הלוחות. כתוצאה מכך מטען הקבל קטן והאנרגיה של הקבל קטנה, ולכן השינוי באנרגיה האגורה בקבל שלילית. במקרה זה, שבו הקבל נשאר מחובר למקור המתח, עבודת הכוח החיצוני היא לא הגורם היחיד לשינוי אנרגיית הקבל, כי גם מקור המתח מבצע עבודה. כאשר נשווה את סכום העבודות המבוצעות בתהליך – עבודת הכוח החיצוני ועבודת מקור המתח – לשינוי באנרגיית הקבל, נקבל בתוצאת החישוב כי עבודת הכוח החיצוני חיובית.

תרגיל מספר 26



מפָּעֵם (בלועזית: דפיברילטור) הוא מכשיר רפואי המשמש להחזרת קצב לב תקין באמצעות העברת פולס חשמלי דרך הלב.

בהדלקת המכשיר נטען קבל הנמצא בתוך המכשיר (ולכן יש צורך בהמתנה קצרה עד להפעלתו). הקבל נשאר טעון ואוגר בתוכו אנרגיה חשמלית.

בהפעלת המכשיר, הקבל נפרק ממטענו בפרק זמן מאוד קצר וכך האנרגיה החשמלית משתחררת בפתאומיות. פולס חשמלי קצר וחזק עובר בין שתי האלקטרודות של המכשיר המחוברות לאדם וכך הוא עובר דרך ליבו. פולס זה נועד להפעלת הפעילות החשמלית התקינה של הלב.

נתון מפָּעֵם המכיל קבל בעל קיבול $C = 120\mu F$

כאשר מדליקים את המפָּעֵם, הקבל נטען למתח של $V = 3kV$.

1. חשבו את המטען של הקבל כאשר הוא טעון למתח המרבי.

הסבר:

מהגדרת הקיבול של קבל מקבלים:

$$Q = C \cdot V = 120 \cdot 10^{-6} \cdot 3,000 = 0.36C$$

2. חשבו את האנרגיה האגורה בקבל כאשר הוא טעון למתח המרבי.

הסבר:

על פי נוסחת האנרגיה של קבל:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \cdot 120 \cdot 10^{-6} \cdot 3,000^2 = 540J$$

במכשירים מתקדמים יש אפשרות לקבוע את האנרגיה שתשתחרר מהקבל הטעון בעת הפעלת המכשיר, כלומר לקבוע מהי האנרגיה שתהיה אגורה בקבל הטעון. שינוי האנרגיה האגורה בקבל יכול להיעשות על ידי שינוי המתח בו הקבל נטען או על ידי שינוי הקיבול החשמלי של הקבל.

באחד מהפעמים בו השתמשו במכשיר היה צורך להגדיל את האנרגיה החשמלית לערך של $1,215J$.

3. בהנחה והקיבול נשאר $C = 120\mu F$, מהו המתח בו יש לטעון את הקבל?

הסבר:

מנוסחת החישוב של אנרגיה של קבל:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 \rightarrow V = \sqrt{\frac{2U}{C}}$$

נציב את הערכים המספריים:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,215}{120 \cdot 10^{-6}}} = 4,500V = 4.5kV$$

4. בהנחה שהמתח לטעינה נותר $V = 3kV$, מהו קיבול הנדרש של הקבל?

הסבר:

על פי נוסחת האנרגיה של קבל:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 \rightarrow C = \frac{2U}{V^2}$$

נציב את הערכים המספריים:

$$C = \frac{2 \cdot 1,215}{3,000^2} = 270 \cdot 10^{-6} F = 270 \mu F$$

5. בחרו, מבין האפשרויות הבאות, את הדרכים בהם אפשר לשנות את קיבול הקבל הנתון

בתחילת התרגיל, לערך שחישבתם בסעיף 4.

(1) הרחקת לוחות הקבל.

(2) קירוב לוחות הקבל.

(3) הגדלת שטח לוחות הקבל.

(4) הקטנת שטח לוחות הקבל.

(5) הכנסת חומר מבודד לנפח הקבל.

(6) הוצאת חומר מבודד מנפח הקבל.

הסבר:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

קיבול קבל לוחות תלוי במספר גדלים, לפי הנוסחה:

בסעיף הקודם קיבלנו כי יש צורך להגדיל את קיבול הקבל המחובר במכשיר.

בין הקיבול לשטח הלוחות יחס ישר, לכן על מנת להגדיל את הקיבול יש להגדיל את שטח הלוחות. לכן הדרך השלישית אפשרית.

בין הקיבול והמרחק בין הלוחות יחס הפוך, לכן על מנת להגדיל את הקיבול יש להקטין את המרחק בין הלוחות. לכן הדרך השנייה אפשרית.

בין הקיבול והמקדם הדיאלקטרי היחסי יחס ישר, לכן על מנת להגדיל את הקיבול, כאשר יש ריק בין הלוחות יש להכניס ביניהם חומר מבודד (מתקיים $\epsilon_r \geq 1$, כאשר $\epsilon_r = 1$ עבור ריק). לכן הדרך החמישית אפשרית.

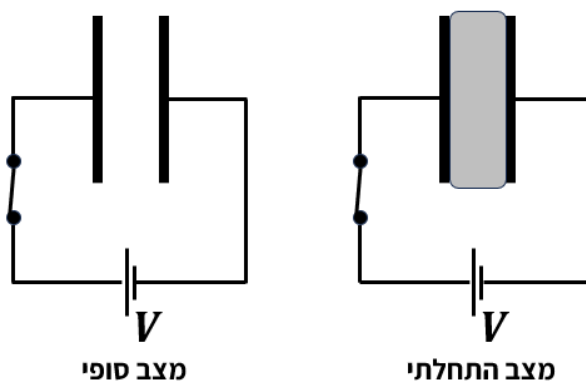
תרגיל מספר 27

במעגל החשמלי המתואר בתרשים נתון קבל לוחות שקיבולו $C = 4\mu F$, מקור מתח אידיאלי בעל מתח $V = 3V$, ומתג S .

ממלאים את נפח בין לוחות הקבל בחומר מבודד בעל קבוע דיאלקטרי יחסי $\epsilon_r = 2$.

סוגרים את המתג וממתינים לגמר טעינת הקבל. נקרא למצב זה "מצב התחלתי".

לאחר גמר הטעינה, בעוד שהמתג נותר סגור, מוציאים את החומר המבודד מבין לוחות הקבל. נקרא למצב זה "מצב סופי".



1. חשבו את האנרגיה האגורה בקבל במצב ההתחלתי.

הסבר:

על פי הנוסחה לחישוב של אנרגיית הקבל:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 10^{-6} \cdot 3^2 = 1.8 \cdot 10^{-5} J$$

2. קבעו עבור כל אחד מהגדלים הבאים האם הוא גדל, קטן או נותר ללא שינוי במצב הסופי ביחס למצב ההתחלתי:

(1) קיבול הקבל.

(2) מתח הקבל.

(3) מטען הקבל.

(4) האנרגיה האגורה בקבל.

הסבירו את קביעתכם.

הסבר:

(1) בין הקיבול למקדם הדיאלקטרי היחסי של החומר המבודד יש יחס ישר, לכן הוצאת החומר המבודד גורם להקטנת הקיבול.

(2) מקור המתח נותר מחובר, לכן המתח בין לוחות הקבל לא משתנה.

(3) מטען הקבל שווה למכפלת הקיבול במתח בין הלוחות. היות והקיבול קטן והמתח לא משתנה, מסיקים כי מטען הקבל קטן.

(4) נוסחת החישוב של אנרגיית הקבל: $U = \frac{1}{2} CV^2$

מאחר שהמתח לא משתנה והקיבול קטן, מבינים שהאנרגיה האגורה בקבל קטנה.

3. חשבו את השינוי באנרגיית הקבל לאחר הוצאת החומר המבודד.
הסבר:

אנרגיית הקבל לאחר הוצאת החומר המבודד:

$$U_f = \frac{1}{2} C_f V_f^2$$

הקיבול לאחר הוצאת החומר המבודד:

$$C_f = \frac{4\mu F}{2} = 2\mu F$$

ולכן:

$$U_f = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 3^2 = 0.9 \cdot 10^{-5} J$$

נחשב כעת את השינוי באנרגיית הקבל:

$$\Delta U = U_f - U_i = 0.9 \cdot 10^{-5} - 1.8 \cdot 10^{-5} = -0.9 \cdot 10^{-5} J$$

4. חשבו את עבודת מקור המתח בתהליך הוצאת החומר המבודד.
הסבר:

עבודת המקור הנה:

$$W_s = V \cdot \Delta Q = V(Q_f - Q_i)$$

מטען הקבל במצב ההתחלתי:

$$Q_i = C_i \cdot V_i = 4 \cdot 10^{-6} \cdot 3 = 12 \cdot 10^{-6} C$$

מטען הקבל במצב הסופי:

$$Q_f = C_f \cdot V_f = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 3 = 6 \cdot 10^{-6} C$$

נציב את הערכים המספריים:

$$W_s = 3 \cdot (6 \cdot 10^{-6} - 12 \cdot 10^{-6}) = -1.8 \cdot 10^{-5} J$$

5. חשבו את עבודת הכוח החיצוני המוציא את החומר המבודד מנפח הקבל.
הסבר:

סכום עבודת הכוח החיצוני ועבודת מקור המתח שווה לשינוי באנרגיית הקבל:

$$W_{ext.} + W_s = \Delta U$$

נציב את התוצאות שקיבלנו בסעיפים הקודמים:

$$W_{ext.} + (-1.8 \cdot 10^{-5}) = -0.9 \cdot 10^{-5}$$

ונקבל:

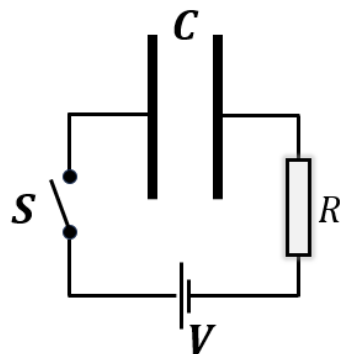
$$W_{ext.} = 0.9 \cdot 10^{-5} J$$

ראו בפתרון סעיף 2 של תרגיל 24 הסבר מפורט לזה שעבודת הכוח החיצוני חיובית.

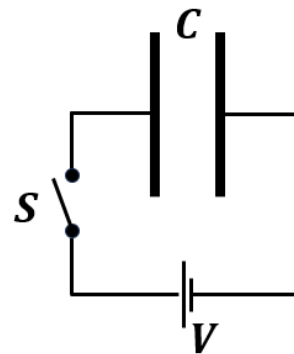
שילוב קבלים במעגל זרם (מצב עמיד)

תרגיל מספר 28

נתונים שני קבלי לוחות זהים, בעלי קיבול $C = 4\mu F$ כל אחד.
קבל 1 חובר למקור מתח אידיאלי בעל מתח $V = 3V$ ומתג S , כמתואר בתרשים א'.
קבל 2 חובר למקור מתח אידיאלי בעל מתח $V = 3V$, נגד שהתנגדותו R ומתג S , כמתואר בתרשים ב'.
כאשר שני הקבלים אינם טעונים, סוגרים את המתג בכל מעגל וממתינים עד גמר טעינת הקבלים.



תרשים ב'



תרשים א'

1. חשבו את מטען קבל 1, Q_1 .

הסבר:

מהגדרת הקיבול של קבל מקבלים:

$$Q_1 = C \cdot V = 4 \cdot 10^{-6} \cdot 3 = 12 \cdot 10^{-6} C = 12\mu C$$

2. חשבו את האנרגיה האגורה בקבל 1, U_1 .

הסבר:

מנוסחת האנרגיה של קבל:

$$U_1 = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 10^{-6} \cdot 3^2 = 1.8 \cdot 10^{-5} J$$

3. (1) קבעו האם מטען קבל 2, Q_2 , גדול, קטן או שווה למטען קבל 1, Q_1 .

(2) קבעו האם האנרגיה האגורה בקבל 2, U_2 , גדולה, קטנה או שווה לאנרגיה האגורה בקבל 1, U_1 .

הסבירו את קביעתכם.

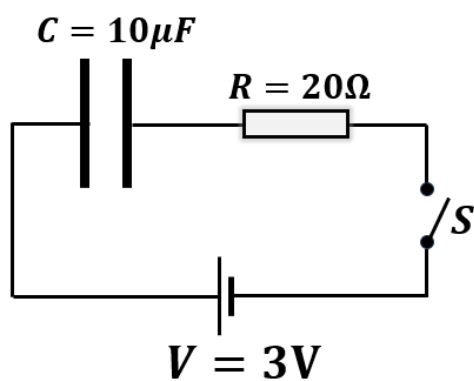
הסבר:

בשני המעגלים, לאחר גמר הטעינה המתח בין לוחות הקבל שווה למתח המקור. זאת מפני שאין זרם במעגל ולכן המתח בין קצות הנגד שבתרשים ב' הוא אפס.
אם כך, לקבלים בשני המעגלים אותו מטען בסוף הטעינה.
נתון שלשני הקבלים אותו קיבול ומאחר שבסוף הטעינה יש להם גם אותו מתח בין הלוחות, הן המטען והן האנרגיה של הקבל 2 שווים לאלה של קבל 1.

4. קבעו האם משך זמן טעינת קבל 1 לוקחת זמן ארוך יותר, קצר יותר או לוקחת אותו פרק זמן, ביחס למשך זמן טעינת קבל 2.
הסבר:

ברגע סגירת המתג מתחילה טעינת הקבל על ידי מעבר מטען דרך מקור המתח מהלוח המחובר להדק השלילי של המקור ללוח המחובר להדק החיובי של המקור. אם כך, במהלך הטעינה עובר זרם חשמלי בחלקים המוליכים של המעגל (לא דרך החומר המבודד שבין לוחות הקבל). בסוף הטעינה בשני הקבלים אותה כמות מטען עברה מלוח אחד לשני, אך כאשר משולב גם נגד במערכת, מעבר אותה כמות מטען לוקח זמן רב יותר (שילוב הנגד גורם לעוצמת הזרם להיות קטנה יותר), לכן זמן הטעינה בתרשים א' יהיה קצר יותר מזה שבתרשים ב' בו יש נגד.

תרגיל מספר 29



תרשים א'

נתון קבל לוחות שאינו טעון, וקיבולו $C = 10\mu F$.

הקבל מחובר למקור מתח אידיאלי בעל מתח $V = 3V$, נגד שהתנגדותו $R = 20\Omega$ ומתג S , כמתואר בתרשים א'.

סוגרים את המתג וממתינים עד גמר טעינת הקבל.

1. מהו מתח הקבל בסוף הטעינה?

הסבר:

לאחר גמר הטעינה, המתח בין הלוחות שווה למתח המקור.

2. חשבו את האנרגיה האגורה בקבל.

הסבר:

האנרגיה האגורה בקבל:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 3^2 = 4.5 \cdot 10^{-5} J$$

3. חשבו את עבודת מקור המתח בתהליך טעינת הקבל.

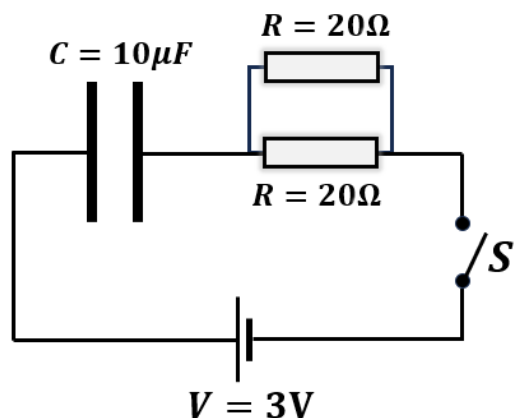
הסבר:

עבודת מקור המתח שווה למכפלה של מתח המקור בכמות המטען החולפת דרכו בתהליך. וכמובן שכמות מטען זאת שווה למטען הקבל בסוף הטעינה:

$$Q = C \cdot V = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 3 = 30 \cdot 10^{-6} C$$

עבודת המקור:

$$W_s = V \cdot \Delta Q = 3 \cdot (30 \cdot 10^{-6} - 0) = 9 \cdot 10^{-5} J$$



פורקים את הקבל ממטענו ומחברים אותו שנית למעגל החשמלי, כאשר מוסיפים עוד נגד, זהה לנגד שהיה במעגל המקורי, ומחברים אותו כמתואר בתרשים ב'. סוגרים את המתג וממתינים לגמר טעינת הקבל.

תרשים ב'

4. עבור הגדלים הבאים, קבעו האם הם גדלים, קטנים או לא משתנים, יחסית לערכם במעגל שבתרשים א'.
- (1) מתח הקבל.
 - (2) מטען הקבל.
 - (3) האנרגיה האגורה בקבל.
 - (4) עבודת מקור המתח.
 - (5) זמן הטעינה של הקבל.
- הסבירו את קביעתכם.

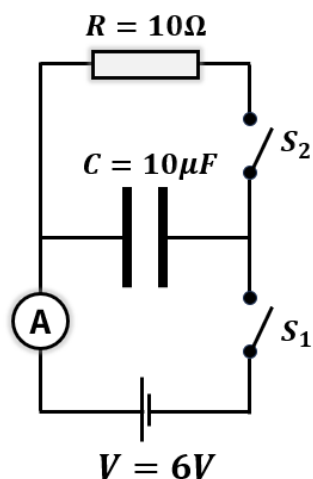
הסבר:

לאחר גמר הטעינה המתח בין לוחות הקבל שווה למתח המקור, שהרי אין זרם במעגל, ולכן המתח בין קצות הנגדים אפס.

אם כך, לא יהיה שינוי באף אחד מהגדלים של הקבל – המתח בין לוחותיו, מטענו, והאנרגיה האגורה בו.

מאחר ומטען הקבל לא משתנה, המטען החולף דרך המקור זהה, ולכן גם עבודת מקור המתח לא משתנה.

אבל, מאחר שעתה ההתנגדות השקולה במעגל קטנה יותר, שהרי הנגדים מחוברים במקביל זה לזה, זמן מעבר המטען מלוח אחד של הקבל ללוח השני בתהליך הטעינה יהיה קצר יותר.



תרגיל מספר 30

נתון קבל לוחות, שאינו טעון, בעל קיבול $C = 10\mu F$.
הקבל מחובר למקור מתח אידיאלי בעל מתח $V = 6V$, נגד
שהתנגדותו $R = 10\Omega$, מד-זרם אידיאלי, ושני מתגים S_1, S_2 ,
כמתואר בתרשים.
במצב ההתחלתי שני המתגים פתוחים.

סוגרים את המתג S_1 וממתנים עד גמר טעינת הקבל.
1. מהו מתח הקבל?

הסבר:

כאשר המתג S_1 סגור, לוחות הקבל מחוברים להדקי המקור.
לאחר גמר הטעינה, המתח בין הלוחות שווה למתח המקור.

2. חשבו את מטען הקבל.

הסבר:

מהגדרת הקיבול של קבל, המקשרת בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין לוחותיו, מקבלים:

$$Q = C \cdot V = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 6 = 60 \cdot 10^{-6} C = 60\mu C$$

3. מהי הוריית מד-הזרם אחרי גמר הטעינה?

הסבר:

לאחר גמר הטעינה אין זרם במעגל כאשר המתג S_1 סגור ו- S_2 פתוח. לכן הוריית מד-הזרם אפס.

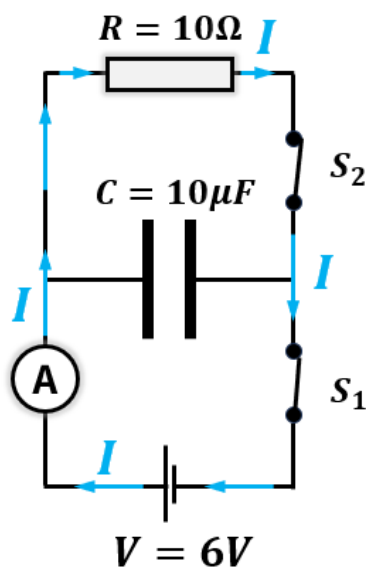
סוגרים גם את המתג S_2 (נשאר סגור) וממתנים עד שהמעגל מתייצב והזרמים בו קבועים.

4. מהי הוריית מד-הזרם?

הסבר:

כאשר שני המתגים סגורים, לוחות הקבל וקצות הנגד מחוברים להדקי המקור. כידוע, בין לוחות הקבל יש חומר מבודד ולכן, לאחר שהמערכת מתייצבת והזרמים קבועים, יעבור זרם קבוע דרך הנגד, במסלול המתואר בתרשים.
על פי חוק אוהם:

$$V = R \cdot I \rightarrow I = \frac{V}{R} = \frac{6}{10} = 0.6A$$



5. עבור הגדלים הבאים, קבעו האם הם גדלים, קטנים או לא משתנים יחסית לערכם

לפני סגירת המפסק S_2 .

(1) מתח הקבל.

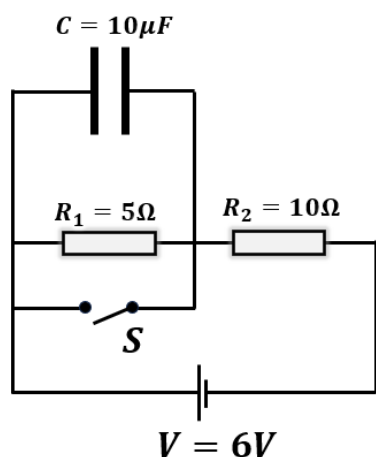
(2) מטען הקבל.

הסבירו את קביעתכם.

הסבר:

לוחות הקבל מחוברים להדקי המקור, ולכן המתח בין הלוחות נותר ללא שינוי וכך גם מטען הקבל.

תרגיל מספר 31



נתון מעגל חשמלי המורכב ממקור מתח אידיאלי $V = 6V$, שני נגדים בעלי התנגדות $R_1 = 5\Omega$, $R_2 = 10\Omega$, קבל לוחות בעל קיבול $C = 10\mu F$, ומתג S . לאחר הרכבת המעגל ממתינים זמן רב עד התייצבות המערכת.

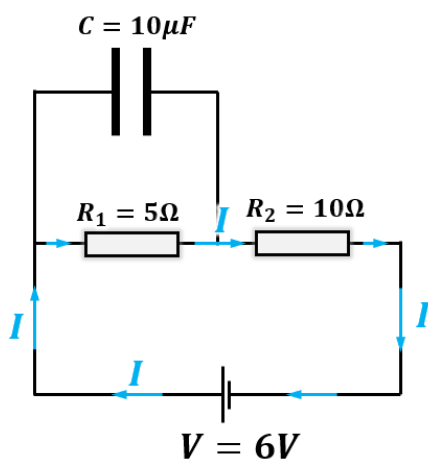
במצב ההתחלתי המתג S פתוח.

1. חשבו את עוצמת הזרם העוברת דרך מקור המתח.

הסבר:

הזרם החשמלי עובר במעגל רק בעניבה בה משולבים הנגדים, כמתואר בתרשים, כי הרי בין לוחות הקבל יש חומר מבודד. שני הנגדים מחוברים בטור, ולכן:

$$V = R_T \cdot I \rightarrow I = \frac{V}{R_T} = \frac{V}{R_1 + R_2} = \frac{6}{15} = 0.4A$$



2. חשבו את מתח הקבל.

הסבר:

לוחות הקבל מחוברים לקצות הנגד שהתנגדותו R_1 , לכן מתח הקבל שווה למתח בין קצות נגד זה. לפי חוק אוהם נקבל:

$$V_C = V_{R_1} = R_1 \cdot I = 5 \cdot 0.4 = 2V$$

3. מהו מטען הלוח הימני של הקבל?

הסבר:

הזרם דרך הנגד שהתנגדותו R_1 ימינה, מה שאומר לנו שלקצה הימני של נגד זה פוטנציאל נמוך יותר מאשר לקצה השמאלי שלו. לוח ימין של הקבל מחובר לקצה הימני של נגד שהתנגדותו R_1 ולכן לוח זה נטען במטען שלילי. מטען הקבל:

$$Q = C \cdot V = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 2 = 20 \cdot 10^{-6} C = 20\mu C$$

ולכן מטענו של לוח ימין: $Q_{Right} = -Q = -20\mu C$

ומטענו של לוח שמאל: $Q_{Left} = +Q = +20\mu C$

4. חשבו את האנרגיה האגורה בקבל.

הסבר:

האנרגיה של קבל:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 2^2 = 2 \cdot 10^{-5} J$$

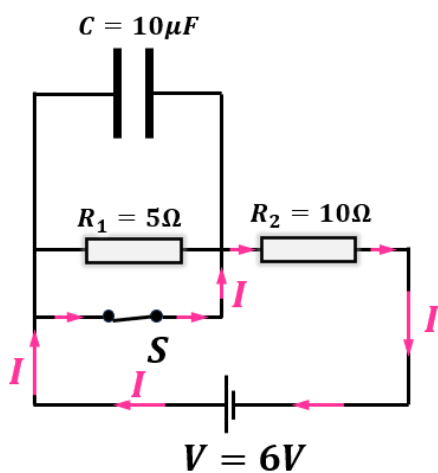
סוגרים את המתג S וממתינים זמן רב עד התייצבות המערכת.

5. מהי עוצמת הזרם העוברת דרך מקור המתח?

הסבר:

כפי שהוסבר בסעיף 1, הזרם החשמלי עובר במעגל רק בעניבה בה משולבים הנגדים, אך הפעם רק דרך הנגד שהתנגדותו R_2 , כמתואר בתרשים. שהרי, מאחר והמתג סגור, המתח בין קצות הנגד R_1 שווה אפס.

$$I = \frac{V}{R_2} = \frac{6}{10} = 0.6 A$$



6. מהו מתח הקבל?

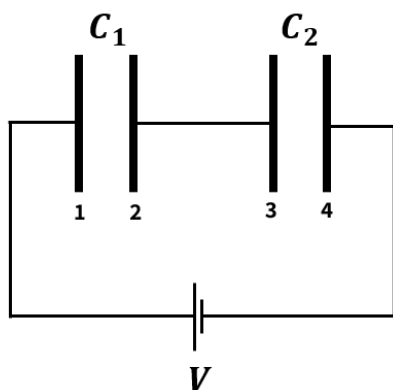
הסבר:

מאחר והמתג סגור, מתח הקבל אפס, שהרי לוחותיו מחוברים לשתי נקודות לאורך אותו תיל מוליך אידיאלי. במקרה זה גם מטען הקבל אפס, והוא נפרק מהקבל במהלך התייצבות המערכת.

חיבור קבלים

תרגיל מספר 32

נתונים שני קבלי לוחות:



קבל לוחות 1 בעל קיבול $C_1 = 3\mu F$ ולוחותיו מסומנים ב-1 ו-2.

קבל לוחות 2 בעל קיבול $C_2 = 6\mu F$ ולוחותיו מסומנים ב-3 ו-4.

מחברים את הקבלים למקור מתח אידיאלי $V = 9V$ כמתואר בתרשים.

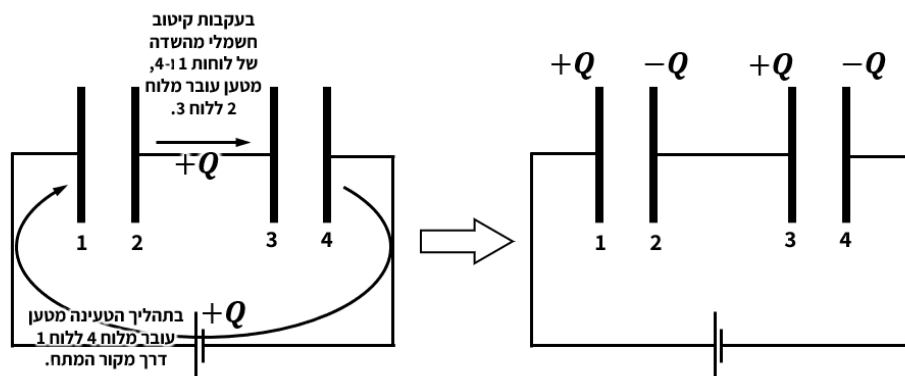
1. בחרו, מבין המשפטים הבאים, את המשפטים הנכונים בדבר מטעני הלוחות:

- (1) מטענו של לוח 1 שווה למטענו של לוח 2.
- (2) מטענו של לוח 1 שווה בגודלו ומנוגד בסימנו למטענו של לוח 2.
- (3) מטענו של לוח 2 שווה למטענו של לוח 3.
- (4) מטענו של לוח 1 שווה למטענו של לוח 3.
- (5) מטענו של לוח 1 שווה בגודלו ומנוגד בסימנו למטענו של לוח 4.

הסבר:

כאשר הקבלים נטענים, מטען חשמלי עובר דרך מקור המתח מלוח 4 ללוח 1 (לפי הדקי מקור המתח). לכן מטעני לוחות אלו שווים בגודלם ומנוגדים בסימנם – לוח 1 טעון חיובית ולוח 2 טעון שלילית. לכן תשובה (5) נכונה.

לוחות 2 ו-3 מחוברים זה לזה, ומאחר והם נמצאים בשדה החשמלי שלוחות 1 ו-4 יוצרים, נוצר בהם קיטוב חשמלי, כך שללוח 3 מטען חיובי וללוח 2 מטען שלילי שערכו המוחלט שווה למטענו של לוח 3 ומטען זה שווה למטען לוח 1. לכן תשובות (2) ו-(4) נכונות.



2. חשבו את הקיבול השקול המחובר למקור המתח.

הסבר:

שני הקבלים מחוברים בטור, לכן:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{1}{2} \rightarrow C_T = 2\mu F$$

3. חשבו את המטענים של קבל 1 ושל קבל 2.

הסבר:

מטען הקבל השקול הנו:

$$Q_T = C_T \cdot V = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 9 = 18 \cdot 10^{-6} C = 18\mu C$$

מאחר ששני הקבלים מחוברים בטור, לשני הקבלים אותו מטען והוא שווה למטען הקבל בשקול. כלומר:

$$Q_1 = Q_2 = Q_T = 18\mu C$$

4. חשבו את המתח של קבל 1 ושל קבל 2.

הסבר:

נחשב את המתח על כל קבל בעזרת הקשר בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין לוחותיו.

$$V_1 = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{18 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-6}} = 6V$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{18 \cdot 10^{-6}}{6 \cdot 10^{-6}} = 3V$$

דרך פתרון נוספת:

מאחר ששני הקבלים מחוברים בטור, המטען שלהם שווה, לכן יחס המתחים הפוך ליחס הקיבולים.

$$Q_1 = Q_2 \rightarrow C_1 V_1 = C_2 V_2 \rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{C_2}{C_1}$$

מערכי הקיבול הנתונים בתרגיל נקבל:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{6}{3} = \frac{2}{1}$$

לכן המתח על קבל 1 הוא:

$$V_1 = \frac{2}{3} V = \frac{2}{3} \cdot 9 = 6V$$

והמתח על קבל 2 הוא:

$$V_2 = \frac{1}{3} V = \frac{1}{3} \cdot 9 = 3V$$

5. חשבו את האנרגיה האגורה במערכת שני הקבלים.

הסבר:

האנרגיה האגורה במערכת שני הקבלים שווה לאנרגיה של הקבל השקול:

$$U_T = \frac{1}{2} C_T V^2 = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 9^2 = 8.1 \cdot 10^{-5} J$$

דרך פתרון נוספת:

האנרגיה האגורה במערכת שני הקבלים שווה לסכום האנרגיות של כל קבל:

$$U_T = U_1 + U_2 = \frac{1}{2} C_1 V_1^2 + \frac{1}{2} C_2 V_2^2$$

נציב את הערכים המספריים:

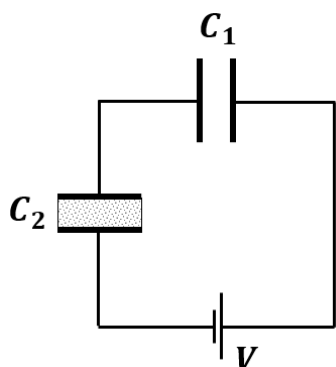
$$U_T = \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot 6^2 + \frac{1}{2} \cdot 6 \cdot 10^{-6} \cdot 3^2 = 8.1 \cdot 10^{-5} J$$

תרגיל מספר 33

במעגל המתואר בתרשים מחוברים שני קבלי לוחות למקור מתח אידיאלי $V = 60V$.

קבל 1 בעל קיבול $C_1 = 8\mu F$.

לקבל 2 קיבול $C_2 = 24\mu F$ ובין לוחותיו חומר מבודד בעל קבוע דיאלקטרי יחסי $\epsilon_r = 3$.



1. חשבו את הקיבול השקול המחובר להדקי מקור המתח.
הסבר:

שני הקבלים מחוברים בטור, לכן:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{8} + \frac{1}{24} = \frac{4}{24} = \frac{1}{6} \rightarrow C_T = 6\mu F$$

2. חשבו את המתח על כל אחד משני הקבלים.
הסבר:

נחשב תחילה את מטען הקבל השקול:

$$Q_T = C_T \cdot V = 6 \cdot 10^{-6} \cdot 60 = 360 \cdot 10^{-6} C = 360\mu C$$

מאחר ששני הקבלים מחוברים בטור, המטען של הקבל השקול שווה למטען של כל אחד משני הקבלים. לכן, בעזרת הקשר בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין לוחותיו נחשב את המתח בין לוחותיו של כל קבל:

$$V_1 = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{360 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 10^{-6}} = 45V$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{360 \cdot 10^{-6}}{24 \cdot 10^{-6}} = 15V$$

דרך פתרון נוספת:

שני הקבלים מחוברים בטור ולכן המטען שלהם שווה. מכאן שיחס המתחים הפוך ליחס הקיבולים.

$$Q_1 = Q_2 \rightarrow C_1 V_1 = C_2 V_2 \rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{C_2}{C_1}$$

מערכי הקיבול הנתונים בתרגיל, נקבל:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{24}{8} = 3$$

לכן המתח על קבל 1 הוא:

$$V_1 = \frac{3}{4} V = \frac{3}{4} \cdot 60 = 45V$$

והמתח על קבל 2 הוא:

$$V_2 = \frac{1}{4} V = \frac{1}{4} \cdot 60 = 15V$$

3. חשבו את האנרגיה הכוללת האגורה בשני הקבלים.

הסבר:

האנרגיה האגורה במערכת שני הקבלים שווה לאנרגיה של הקבל השקול:

$$U_T = \frac{1}{2} C_T V^2 = \frac{1}{2} \cdot 6 \cdot 10^{-6} \cdot 60^2 = 10.8 \cdot 10^{-3} J$$

דרך פתרון נוספת:

האנרגיה האגורה במערכת שני הקבלים שווה לסכום האנרגיות של כל קבל:

$$U_T = U_1 + U_2 = \frac{1}{2} C_1 V_1^2 + \frac{1}{2} C_2 V_2^2$$

נציב את הערכים המספריים:

$$U_T = \frac{1}{2} \cdot 8 \cdot 10^{-6} \cdot 45^2 + \frac{1}{2} \cdot 24 \cdot 10^{-6} \cdot 15^2 = 10.8 \cdot 10^{-3} J$$

בעוד מקור המתח נותר מחובר, מוציאים את החומר המבודד מבין לוחות קבל 2.

4. חשבו את המתח על כל אחד משני הקבלים במצב החדש.

הסבר:

לאחר הוצאת החומר המבודד מקבל 2, הקיבול שלו קטן פי ϵ_r :

$$C_2 = \frac{24 \mu F}{3} = 8 \mu F$$

שני הקבלים מחוברים בטור, לכן סכום המתחים שלהם שווה למתח המקור. מאחר שעתה לשני הקבלים אותו קיבול, המתח עליהם שווה ולכן:

$$V_1 = V_2 = \frac{1}{2} V = 30 V$$

5. חשבו את האנרגיה הכוללת האגורה בשני הקבלים.

הסבר:

האנרגיה האגורה במערכת שני הקבלים שווה לאנרגיה של הקבל השקול.

נחשב את הקיבול השקול החדש של שני הקבלים:

$$\frac{1}{C_T^*} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2^*} = \frac{1}{8} + \frac{1}{8} = \frac{1}{4} \rightarrow C_T^* = 4 \mu F$$

נחשב את האנרגיה האגורה בקבל השקול במצב החדש:

$$U_T^* = \frac{1}{2} C_T^* V^2 = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 10^{-6} \cdot 60^2 = 7.2 \cdot 10^{-3} J$$

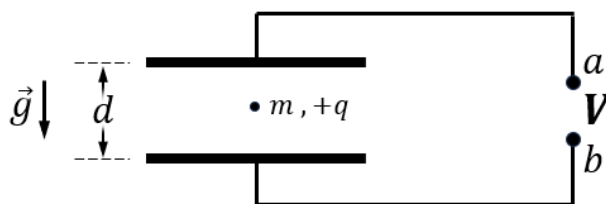
תרגיל מספר 34

נתון קבל לוחות אשר המרחק בין לוחותיו $d = 20\text{mm}$.

מחברים את הלוחות למקור מתח V וממתינים לגמר טעינת הקבל.

מטען הקבל בגמר הטעינה $Q = 5.31\mu\text{C}$.

בין לוחות הקבל מציבים חלקיק נקודתי, שמסתו $m = 1.2 \cdot 10^{-3}\text{kg}$ ומטענו $q = 2\text{nC}$, ומשחררים אותו. נתון כי החלקיק נשאר במנוחה.



תרשים א'

1. לאיזו נקודה, a או b , פוטנציאל חשמלי גדול יותר?

הסבר:

הכוחות הפועלים על החלקיק הם כוח הכובד והכוח החשמלי מהשדה שבתחום בין הלוחות. נתון כי החלקיק במנוחה ולכן, לפי חוק ראשון של ניוטון, שקול הכוחות הפועלים עליו אפס. אם כך, מבינים שהכוח החשמלי על החלקיק מכוון אנכית מעלה.

הכוח החשמלי על מטען חיובי מכוון בכיוון השדה החשמלי, שהרי $\vec{F} = q\vec{E}$. מכאן שהשדה החשמלי מכוון אנכית מעלה.

השדה החשמלי מכוון תמיד לעבר הפוטנציאל הנמוך, לכן אם הוא מכוון אנכית מעלה, מסיקים שללוח התחתון פוטנציאל גבוה יותר מהפוטנציאל של הלוח העליון. הלוח התחתון מחובר לנקודה b , לכן לנקודה זו פוטנציאל גדול יותר.

2. חשבו את מתח המקור.

הסבר:

מתח המקור שווה למתח בין לוחות הקבל, לכן:

$$E = \frac{V}{d} \rightarrow (1) V = E \cdot d$$

את עוצמת השדה החשמלי נבטא בעזרת הכוחות הפועלים על החלקיק, כאשר ששקול הכוחות אפס.

$$mg = qE \rightarrow (2) E = \frac{mg}{q}$$

נציב את הביטוי (2) בביטוי (1):

$$V = E \cdot d = \frac{mg}{q} d = \frac{1.2 \cdot 10^{-3} \cdot 10}{2 \cdot 10^{-9}} \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 120,000\text{V} = 120\text{kV}$$

3. חשבו את השטח של כל לוח.

הסבר:

מהקשר בין עוצמת השדה בין לוחות הקבל, למטענו ושטח לוחותיו:

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 A} \rightarrow A = \frac{Q}{\epsilon_0 E}$$

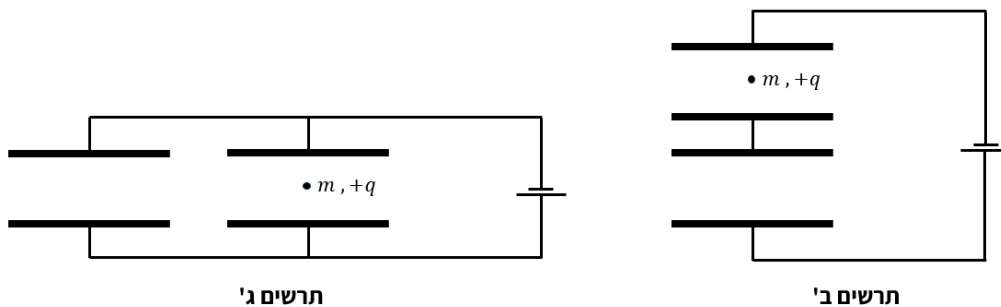
נחשב את עוצמת השדה החשמלי בעזרת ביטוי (2) שפיתחנו בסעיף 2:

$$E = \frac{mg}{q} = \frac{1.2 \cdot 10^{-3} \cdot 10}{2 \cdot 10^{-9}} = 6 \cdot 10^6 \text{ V/m}$$

נציב את הערכים המספריים לחישוב שטח הלוחות:

$$A = \frac{Q}{\epsilon_0 E} = \frac{5.31 \cdot 10^{-6}}{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 6 \cdot 10^6} = 0.1 \text{ m}^2$$

מוסיפים לקבל הנתון בתחילת התרגיל קבל זהה לו. במקרה אחד מחברים את הקבל הנוסף בטור לקבל הנתון, כמתואר בתרשים ב'. במקרה שני, מחברים את הקבל הנוסף במקביל לקבל הנתון, כמתואר בתרשים ג'.



4. מבין המשפטים הבאים, קבעו מהו המשפט הנכון:

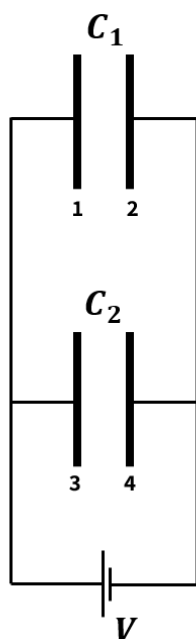
- (1) החלקיק הנקודתי יישאר במנוחה בשני המצבים המתוארים בתרשימים ב' ו-ג'.
- (2) החלקיק הנקודתי יישאר במנוחה במצב המתואר בתרשים ב' וינוע במצב המתואר בתרשים ג'.
- (3) החלקיק הנקודתי ינוע במצב המתואר בתרשים ב' ויישאר במנוחה במצב המתואר בתרשים ג'.
- (4) החלקיק הנקודתי לא יישאר במנוחה באף אחד מהמצבים המתוארים בתרשימים ב' ו-ג'.

הסבר:

בתרשים ב' מוסיפים קבל לוחות בטור, לכן המתח של מקור המתח מתחלק עתה בין שני הקבלים, כך שהמתח על הקבל בו החלקיק הטעון קטן עכשיו ממתח המקור. אם כך, עוצמת השדה החשמלי בתחום בין הלוחות של קבל זה קטנה יותר.

הכוח החשמלי על החלקיק יהיה קטן יותר, לכן כוח הכובד יהיה גדול יותר והחלקיק לא יישאר במנוחה (ויואץ מטה).

בתרשים ג' מוסיפים קבל לוחות במקביל, לכן המתח בין לוחות כל אחד מהקבלים יהיה שווה למתח המקור. לכן, בין הלוחות הקבל בו החלקיק הטעון נשאר אותו מתח, וכן אותו שדה. במצב זה החלקיק יישאר במנוחה.



תרגיל מספר 35

נתונים שני קבלי לוחות:

קבל 1 בעל קיבול $C_1 = 3\mu F$ ולוחותיו מסומנים ב-1 ו-2.

קבל 2 בעל קיבול $C_2 = 6\mu F$ ולוחותיו מסומנים ב-3 ו-4.

מחברים את הקבלים למקור מתח אידיאלי $V = 3V$ כמתואר בתרשים.

1. בחרו, מבין המשפטים הבאים, את המשפטים הנכונים בדבר מטעני הלוחות:

- (1) מטענו של לוח 1 שווה למטענו של לוח 2.
- (2) מטענו של לוח 1 שווה בגודלו ומנוגד בסימנו למטענו של לוח 2.
- (3) מטענו של לוח 1 שווה למטענו של לוח 3.
- (4) מטענו של לוח 2 שווה למטענו של לוח 4.
- (5) מטענו של לוח 3 שווה בגודלו ומנוגד בסימנו למטענו של לוח 4.

הסבר:

הקבלים מחוברים במקביל זה לזה והקיבול שלהם שונה, לכן יש להם אותו מתח. מכאן שמטעני הקבלים שונים. מה שאומר שהמשפטים (3) ו-(4) אינם נכונים.

במהלך הטעינה עובר מטען חשמלי מלוח 2 ללוח 1, ומלוח 4 ללוח 3, דרך מקור המתח. ולכן מטענו של לוח 1 שווה בגודלו ומנוגד בסימנו למטענו של לוח 2, וכך גם עבור הלוחות 3 ו-4.

2. חשבו את הקיבול השקול המחובר למקור המתח.

הסבר:

שני הקבלים מחוברים במקביל, לכן:

$$C_T = C_1 + C_2 = 3 + 6 = 9\mu F$$

3. חשבו את המטענים של קבל 1 ושל קבל 2.

הסבר:

מאחר ושני הקבלים מחוברים במקביל, המתח בין לוחות הקבלים שווה.

בעזרת הקשר בין מטען הקבל, קיבולו והמתח בין לוחותיו נחשב את מטענו של כל קבל:

$$Q_1 = C_1 \cdot V_1 = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 3 = 9 \cdot 10^{-6} C = 9\mu C$$

$$Q_2 = C_2 \cdot V_2 = 6 \cdot 10^{-6} \cdot 3 = 18 \cdot 10^{-6} C = 18\mu C$$

4. חשבו את האנרגיה האגורה במערכת שני הקבלים.

הסבר:

האנרגיה האגורה במערכת שני הקבלים שווה לאנרגיה של הקבל השקול:

$$U_T = \frac{1}{2} C_T V^2 = \frac{1}{2} \cdot 9 \cdot 10^{-6} \cdot 3^2 = 4.05 \cdot 10^{-5} J$$

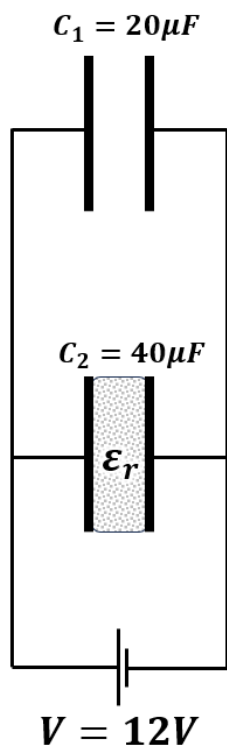
דרך פתרון נוספת:

האנרגיה האגורה במערכת שני הקבלים שווה לסכום האנרגיות של כל קבל:

$$U_T = U_1 + U_2 = \frac{1}{2} C_1 V_1^2 + \frac{1}{2} C_2 V_2^2$$

נציב את הערכים המספריים:

$$U_T = \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot 3^2 + \frac{1}{2} \cdot 6 \cdot 10^{-6} \cdot 3^2 = 4.05 \cdot 10^{-5} J$$



תרגיל מספר 36

נתונים שני קבלי לוחות:

קבל לוחות 1 בעל קיבול $C_1 = 20\mu F$.

קבל לוחות 2 בעל קיבול $C_2 = 40\mu F$ ובין לוחותיו חומר מבודד בעל קבוע דיאלקטרי יחסי $\epsilon_r = 2$.

מחברים את הקבלים למקור מתח אידיאלי $V = 12V$ כמתואר בתרשים.

1. חשבו את הקיבול השקול המחובר למקור המתח.
הסבר:

שני הקבלים מחוברים במקביל, לכן:

$$C_T = C_1 + C_2 = 20 + 40 = 60\mu F$$

2. חשבו את האנרגיה האגורה במערכת שני הקבלים.
הסבר:

האנרגיה האגורה במערכת שני הקבלים שווה לאנרגיה של הקבל השקול:

$$U_T = \frac{1}{2} C_T V^2 = \frac{1}{2} \cdot 60 \cdot 10^{-6} \cdot 12^2 = 4.32 \cdot 10^{-3} J$$

דרך פתרון נוספת:

האנרגיה האצורה במערכת שני הקבלים שווה לסכום האנרגיות של כל קבל:

$$U_T = U_1 + U_2 = \frac{1}{2} C_1 V_1^2 + \frac{1}{2} C_2 V_2^2$$

נציב את הערכים המספריים:

$$U_T = \frac{1}{2} \cdot 20 \cdot 10^{-6} \cdot 12^2 + \frac{1}{2} \cdot 40 \cdot 10^{-6} \cdot 12^2 = 43.2 \cdot 10^{-4} J$$

עתה מנתקים את מקור המתח ולאחר מכן מוציאים את החומר המבודד מקבל 2.

3. חשבו את הקיבול השקול של שני הקבלים במצב זה.
הסבר:

לאחר הוצאת החומר המבודד מקבל 2, הקיבול שלו קטן פי ϵ_r :

$$C_2^* = \frac{40\mu F}{2} = 20\mu F$$

שני הקבלים מחוברים במקביל, לכן:

$$C_T^* = C_1 + C_2^* = 20 + 20 = 40\mu F$$

4. חשבו את האנרגיה האגורה במערכת שני הקבלים במצב החדש.

הסבר:

מאחר שמקור המתח מנותק, המטען הכולל במערכת נשמר. מטען זה הנו המטען על הקבל השקול טרם הוצאת החומר המבודד.

$$Q = 60 \cdot 10^{-6} \cdot 12 = 720 \cdot 10^{-6} C = 720 \mu C$$

האנרגיה האגורה במערכת שני הקבלים שווה לאנרגיה של הקבל השקול:

$$U_T = \frac{1}{2} C_T V^2 = \frac{Q_T^2}{2C_T} = \frac{(720 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} = 64.8 \cdot 10^{-4} J$$

5. חשבו את עבודת הכוח החיצוני בהוצאת החומר המבודד.

הסבר:

עבודת הכוח החיצוני שווה לשינוי באנרגיית המערכת (מקור המתח מנותק ולכן אינו מבצע עבודה).

$$W_{ext} = \Delta U = U_f - U_i = 64.8 \cdot 10^{-4} - 43.2 \cdot 10^{-4} = 21.6 \cdot 10^{-4} J$$

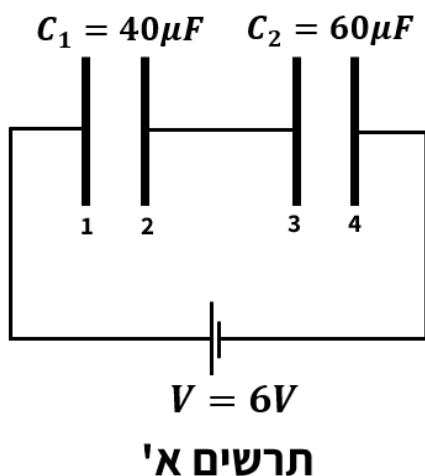
תרגיל מספר 37

נתונים שני קבלי לוחות לא טעונים:

קבל 1 בעל קיבול $C_1 = 40\mu F$ ולוחותיו מסומנים ב-1 ו-2.

קבל 2 בעל קיבול $C_2 = 60\mu F$ ולוחותיו מסומנים ב-3 ו-4.

מחברים את הקבלים למקור מתח אידיאלי $V = 9V$, כמתואר בתרשים א', וממתינים עד גמר הטעינה.



1. מהו הקיבול השקול המחובר למקור המתח?
הסבר:

שני הקבלים מחוברים בטור, לכן:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{40} + \frac{1}{60} = \frac{5}{120} = \frac{1}{24} \rightarrow C_T = 24\mu F$$

2. מהו מטענו של לוח 1 אשר בקבל 1?
הסבר:

מטען הקבל השקול הנו:

$$Q_T = C_T \cdot V = 24 \cdot 10^{-6} \cdot 6 = 144 \cdot 10^{-6} C = 144\mu C$$

מאחר ששני הקבלים מחוברים בטור, לשני הקבלים אותו מטען והוא שווה למטען הקבל בשקול, לכן:

$$Q_1 = Q_2 = Q_T = 144\mu C$$

לוח 1 של קבל 1 מחובר לפוטנציאל הגבוה של מקור המתח, לכן מטענו של לוח 1 חיובי:

$$Q_{11} = +144\mu C$$

3. מהו מטענו של לוח 4 של קבל 2?
הסבר:

כפי שחישבנו בסעיף 2, מטענם של הקבלים הם:

$$Q_1 = Q_2 = Q_T = 144\mu C$$

לוח 4 של קבל 2 מחובר לפוטנציאל הנמוך של מקור המתח, לכן מטענו של לוח 4 שלילי:

$$Q_{24} = -144\mu C$$

4. חשבו את האנרגיה האגורה בשני הקבלים יחדיו.

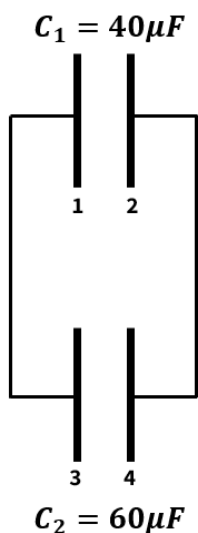
הסבר:

האנרגיה האגורה במערכת שני הקבלים שווה לאנרגיה של הקבל השקול:

$$U_T = \frac{1}{2} C_T V^2 = \frac{1}{2} \cdot 24 \cdot 10^{-6} \cdot 6^2 = 4.32 \cdot 10^{-4} J$$

עתה מנתקים את הקבלים ממקור המתח וזה מזה.

לאחר מכן מחברים את הקבלים זה לזה כמתואר בתרשים ב' (שימו לב למספרי הלוחות המחוברים זה לזה). ממתינים להתייצבות המערכת.



5. בחרו, מבין המשפטים הבאים, את המשפט המתאר נכון את המתרחש במערכת מרגע חיבור הקבלים זה לזה.

- (1) מטענים יעברו בין הלוחות המחוברים זה לזה.
- (2) מטענים יעברו בין הלוחות 1 ו-2 ובין הלוחות 3 ו-4.
- (3) לא יעבור כלל מטען.
- (4) הקבלים יתפרקו ממטענם.

הסבר:

בחיבור לוח 1 עם לוח 3, ולוח 2 עם לוח 4, מטענים יעברו בין זוגות הלוחות המחוברים. הסיבה למעבר זה היא שלפני חיבורם כמתואר בתרשים ב', המתח בין לוחות קבל 1 היה שונה מהמתח בין לוחות קבל 2 כלומר ללוחות שעתה מחוברים היו ברגע החיבור פוטנציאלים שונים. לכן יתרחש מעבר מטען בין הלוחות המחוברים, עד להשוואת הפוטנציאלים שלהם.

6. חשבו את הקיבול השקול של מערכת שני הקבלים.

הסבר:

בצורת חיבור זו של הקבלים המתח בין לוחותיהם שווה, לכן מסיקים שהקבלים מחוברים במקביל.

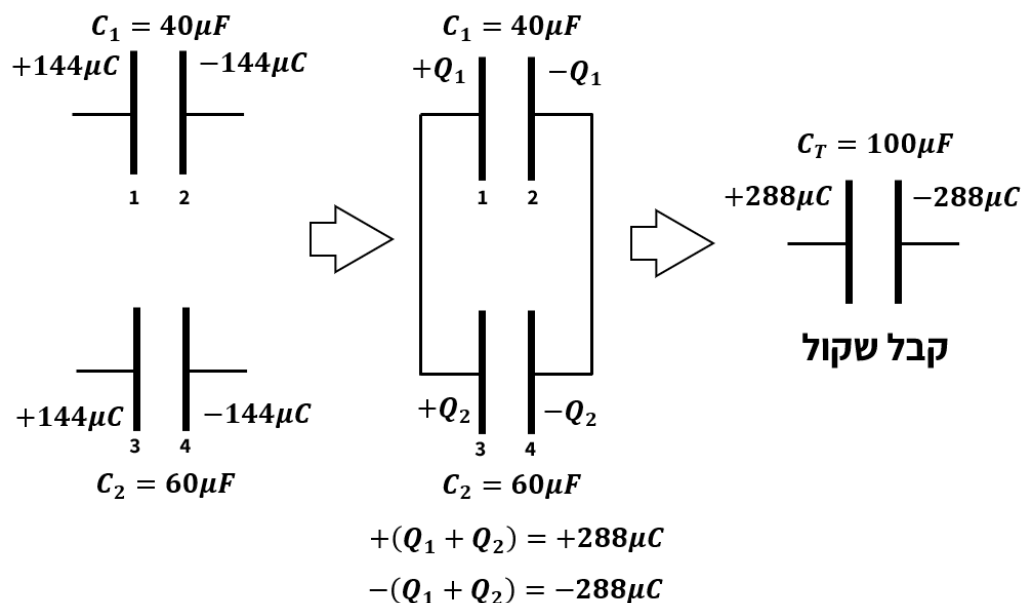
הקיבול השקול:

$$C_T = C_1 + C_2 = 40 + 60 = 100\mu F$$

7. חשבו את האנרגיה האגורה במערכת שני הקבלים.

הסבר:

כאשר אנו מחברים את לוחות הקבלים כמתואר, ולאחר שהמערכת התייצבה, אומנם המטען על כל קבל אחר, אך סך המטען הקיים בשני הלוחות יחד נשמר (מקור המתח מנותק). לכן במערכת זו בשני הלוחות 1 ו-3 המטען הכולל יישאר $288\mu\text{C}$, ובשני הלוחות 2 ו-4 המטען הכולל יישאר $-288\mu\text{C}$. אם כך, עבור הקבל השקול, כל אחד מלחותיו יהיה טעון במטען שערכו המוחלט $288\mu\text{C}$.



האנרגיה האגורה במערכת שני הקבלים במצב זה שווה לאנרגיה של הקבל השקול:

$$U_T = \frac{1}{2} C_T V^2 = \frac{Q_T^2}{2C_T} = \frac{(288 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 4.1472 \cdot 10^{-4} \text{J} \approx 4.15 \cdot 10^{-4} \text{J}$$